



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

Redução de Complexidade de Decodificação de Imagens Baseada na Mudança de Resolução

Autor: Gilvandson Costa Cavalcante
Orientador: Dr. Diogo Caetano Garcia
Coorientador: Dr. Flávio Ferreira Lima

Brasília, DF
2014



Gilvandson Costa Cavalcante

Redução de Complexidade de Decodificação de Imagens Baseada na Mudança de Resolução

Monografia submetida ao curso de graduação
em Engenharia Eletrônica da Universidade
de Brasília, como requisito parcial para ob-
tenção do Título de Bacharel em Engenharia
Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr. Diogo Caetano Garcia

Coorientador: Dr. Flávio Ferreira Lima

Brasília, DF

2014

Gilvanson Costa Cavalcante

Redução de Complexidade de Decodificação de Imagens Baseada na Mudança de Resolução/ Gilvanson Costa Cavalcante. – Brasília, DF, 2014-
95 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Diogo Caetano Garcia

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2014.

1. JPEG. 2. H264/AVC. I. Dr. Diogo Caetano Garcia. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Redução de Complexidade de Decodificação de Imagens Baseada na Mudança de Resolução

CDU 02:191:025.6

Gilvandson Costa Cavalcante

Redução de Complexidade de Decodificação de Imagens Baseada na Mudança de Resolução

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 27 de novembro de 2014:

Dr. Diogo Caetano Garcia
Orientador

Dr. Flávio Ferreira Lima
Coorientador

Dr. Edson Mintsu Hung
Examinador Interno (FGA/UNB)

Me. Renan Utida Ferreira
Examinador Interno (FGA/UNB)

Brasília, DF
2014

Dedicatória.

*Este trabalho é dedicado aos meus filhos,
Nalbesth Costa Ferreira Cavalcante e
Gustavo Henrique de Freitas Cavalcante.*

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus sobre todas as coisas, em seguida meu pai José Ribamar de Jesus Cavalcante e minha mãe que Deus a levou para próximo dele, Maria de Lourdes Costa Oliveira que me incentivaram muito seguir a carreira de Engenheiro Eletrônico, meus grandes amigos de infância Anderson Nogueira e Luciana Viana que sempre estiveram comigo nos momentos difíceis e alegres da minha vida, os meus amigos de trabalho, Fábio Costa, Cristopher Yamoto, Edson Sampaio, Letícia Cardoso, Elza Fernandes, Luciana, Edilon Esaú, Filipe Hudson, em especial o Dr. Flávio Ferreira Lima que além de ser o meu grande amigo, aceitou ser meu Coorientador e me ensinou muitas coisas na área de Radiodifusão de sons e imagens. Minhas prezadas estimas vão também aos meus amigos da Câmara dos Deputados que ajudaram e apoiaram muito o meu desenvolvimento profissional, Luis Barreto, Fabiano Costa, Abrão Aidar, Gilberto Pereira e o Luiz Flávio. É claro, um eterno apreço aos professores da Universidade de Brasília, especialmente aos professores, Dr. Diogo Caetano Garcia meu orientador, Dr. Sandro Augusto Pavlik Haddad e Dr. Welligton Avelino do Amaral que confiaram em mim e contribuíram de forma bastante significativa para o meu crescimento profissional e intelectual.

Epígrafe.

*“Pois será como a árvore plantada junto a
ribeiros de água, a qual dá o seu fruto
na estação própria, e cujas folhas
não caem, e tudo quanto fizer prosperará.
(Bíblia Sagrada, Salmos 1, 3)*

Resumo

O objetivo deste trabalho é reduzir o gasto de energia para a decodificação de imagens em receptores de rádio digital. Ao reduzir a resolução de imagens, sem perda significativa de qualidade, após o processo de codificação reduz-se a taxa de transmissão, proporcionando menor ocupação espectral e maior velocidade de recepção, o que leva a um processamento mais rápido, com menor gasto de energia. Para tratar a imagem, utilizou-se o método proposto por Carlos Salazar, que utiliza a Transformada Discreta dos Cossenos para separar as componentes de baixa e de alta frequência. Assim, desenvolveu-se um algoritmo que realiza esta operação, para ser aplicado em sistemas de rádio digital, como por exemplo, na transmissão de páginas em HTML na faixa de ondas curtas. Entretanto, nada impede que as imagens resultantes das técnicas sejam transmitidas utilizando outros tipos de modulações digitais usadas no rádio ou na televisão. Para confirmar a eficiência do método aplicado, realizaram-se testes de qualidade objetiva, comparando o método proposto por Carlos Salazar com os algoritmos clássicos de interpolação.

Palavras-chaves: HTML, JPEG, H264/AVC, Interpolações, Ondas Curtas.

Abstract

The aim in the report is reduce the energy spent to images decodification in digital radio receptors. To reduce the image resolution lossless after the codification process, the rate transmission is reduced to provide a small spectral occupation and the best reception speed, which leads to a quicker process, with small energy spent. To process the image is used the method proposed by Carlos Salazar, that uses the Discrete Cosine Transform to separate the low-frequency and high-frequency components. Such, was developed an algorithm that performs this operation, to be applied in digital radio system e.g. in HTML webpage transmission at the shortwave range. However, nothing prevents that the resulting images techniques are transmitted used other kinds digital modulation used in the radio and in the television. To confirm the efficiency of the method applied was realized objective image quality assessment, comparing the method proposed by Carlos Salazar with the algorithms classic of the interpolation.

Key-words: HTML, JPEG, H264/AVC, Interpolation, Short Wave.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Imagem original composta por três canais de cores com o tamanho de 512×512 <i>pixels</i>	23
Figura 2 – Representação apenas do canal verde com o tamanho de 512×512 <i>pixels</i>	24
Figura 3 – Trecho de tamanho 10×10 <i>pixels</i>	24
Figura 4 – Processo de captura de uma câmara fotográfica.< www.fazendovideo.com.br >	25
Figura 5 – Fluxograma referente a parte de compressão e descompressão JPEG	29
Figura 6 – Diagrama de blocos do codificador H.264/AVC (RICHARDSON, 2003)	31
Figura 7 – Fluxograma do decodificador H264 (RICHARDSON, 2003)	31
Figura 8 – Processo de DownSample/UpSample (SALAZAR; TRAN, 2005)	35
Figura 9 – Algoritmo proposto para DownSample	35
Figura 10 – Alteração da imagem extraída do < www.travlang.com >	36
Figura 11 – Matriz de Coeficientes DCT	39
Figura 12 – Algoritmo proposto para UpSample	39
Figura 13 – Esta ferramenta proporcionou uma redução no tempo gasto de 2 segundos para 10 milissegundos.	40
Figura 14 – Resposta das curvas de interpolações com o JPG resolução 7/8	41
Figura 15 – Resposta das curvas de interpolações com o JPG resolução 3/8	41
Figura 16 – Resposta das curvas de interpolações com o JPG resolução 1/8	42
Figura 17 – Resposta das curvas de interpolações com o JPG resolução 2/8	43
Figura 18 – Algoritmo sugerido para aborda o problema proposto	44
Figura 19 – Curvas obtidas do algoritmo desenvolvido no trabalho da Imagem Crew	47
Figura 20 – Curvas obtidas do algoritmo desenvolvido no trabalho da Imagem Crew	47
Figura 21 – Plataforma proposta de um sistema de transmissão e recepção em ondas curtas	48
Figura 22 – Telas de abertura do software Spark e do Servidor de Conteúdo com configuração inicial.	49
Figura 23 – Configuração Inicial da Rádio	50
Figura 24 – Tela inicial do receptor digital	51
Figura 25 – Informações do sinal que está sendo recebido	52
Figura 26 – Receptor UniWave	53
Figura 27 – Receptor alternativo implementado via computador	53
Figura 28 – Receptor alternativo implementado via computador	54
Figura 29 – Receptor alternativo implementado via computador	54
Figura 30 – Desempenho das imagens	57

Figura 31 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 7/8	63
Figura 32 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 7/8 .	64
Figura 33 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 6/8	64
Figura 34 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 6/8 .	65
Figura 35 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 5/8	65
Figura 36 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 5/8 .	66
Figura 37 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 4/8	66
Figura 38 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 4/8 .	67
Figura 39 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 3/8	67
Figura 40 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 3/8 .	68
Figura 41 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 2/8	68
Figura 42 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 2/8 .	69
Figura 43 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 1/8	69
Figura 44 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 1/8 .	70
Figura 45 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Mobcal que foi codificada pelo H.264//AVC	71
Figura 46 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Mobcal que foi codificada pelo JPEG	72
Figura 47 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Parkrun que foi codificada pelo H.264//AVC	72
Figura 48 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Parkrun que foi codificada pelo JPEG	73
Figura 49 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Shield que foi codificada pelo H.264//AVC	73
Figura 50 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Shield que foi codificada pelo JPEG	74
Figura 51 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem City que foi codificada pelo H.264//AVC	74
Figura 52 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem City que foi codificada pelo JPEG	75

Figura 53 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Goldhill que foi codificada pelo H.264//AVC	75
Figura 54 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Goldhill que foi codificada pelo JPEG	76
Figura 55 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento resolução resultantes das análises na imagem Airplane que foi codificada pelo H.264//AVC	76
Figura 56 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Airplane que foi codificada pelo JPEG	77
Figura 57 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Barbara que foi codificada pelo H.264//AVC	77
Figura 58 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Barbara que foi codificada pelo JPEG	78
Figura 59 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Mandrill que foi codificada pelo H.264//AVC	78
Figura 60 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Mandrill que foi codificada pelo JPEG	79
Figura 61 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Lena que foi codificada pelo H.264//AVC	79
Figura 62 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Lena que foi codificada pelo JPEG	80
Figura 63 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Peppers que foi codificada pelo H.264//AVC	80
Figura 64 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Peppers que foi codificada pelo JPEG	81

Figura 65 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada.(Mobcal)	82
Figura 66 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada.(Parkrun)	82
Figura 67 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada.(Shields)	83
Figura 68 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Stockholm)	83
Figura 69 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Airplane)	84
Figura 70 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Barbara)	84
Figura 71 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (City)	85
Figura 72 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Crew)	85
Figura 73 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (GoldHill)	86

Figura 74 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Lena)	86
Figura 75 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Mandrill)	87
Figura 76 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Peppers)	87
Figura 77 – Mobcal Resolução de 1280 x 720	89
Figura 78 – Parkrun Resolução de 1280 x 720	89
Figura 79 – Shields Resolução de 1280 x 720	90
Figura 80 – SockHolm Resolução de 1280 x 720	90
Figura 81 – City Resolução de 704 x 576	91
Figura 82 – Crew Resolução de 704 x 576	91
Figura 83 – GoldHill Resolução de 720 x 576	92
Figura 84 – Airplane Resolução de 512 x 512	93
Figura 85 – Barbara Resolução de 512 x 512	94
Figura 86 – Lena Resolução de 512 x 512	94
Figura 87 – Mandril Resolução de 512 x 512	95
Figura 88 – Peppers Resolução de 512 x 512	95

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultados de cada imagem	55
Tabela 2 – Resultados da transmissão das imagens com compressão JPEG	56

Lista de abreviaturas e siglas

AM	Modulação em Amplitude
BER	<i>Bit-Error rate</i>
CBT	Código Brasileiro de Telecomunicações
CIF	<i>Common Intermediate Format</i>
DPCM	Modulação por codificação diferencial de pulsos
DRM	<i>Digital Radio Mundiale</i>
DRM	<i>Digital radio mondiale</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FM	Modulação em Frequência
IBOC	<i>In-Band-On-Channel</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IRDR	<i>International Radio for Disaster Relief</i>
LGT	Lei Geral de Telecomunicações
MD	Modulação Delta
MOS	<i>Mean Opinion Score</i>
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
OC	Ondas Curtas
OT	Ondas Tropicais
OM	Ondas Médias
PSNR	<i>Peak Signal-to-Noise Ratio</i>
QCIF	<i>Quarter-Common Intermediate Format</i>
RADCOM	Rádio Comunitária
RGB	<i>Red, Green e Blue</i>

RLE	<i>Run-Length Encoding</i>
RTV	Retransmissão de Televisão
RTVD	Retransmissão de Televisão Digital
SSIM	<i>Structural Similarity</i>
SUB-QCIF	<i>Sub - Quarter Common Intermediate Format</i>
SVH	Sistema Visual Humano
TVD	Televisão Digital
TV	Televisão
UIT	União Internacional de Telecomunicações
YCrCb	Luminância, Crominâncias vermelha e azul
4CIF	<i>Four-Common Intermediate Format</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contextualização e Justificativa	20
1.2	Objetivo Geral	21
1.3	Objetivo Específico	21
1.4	Escopo da Dissertação	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Transmissão de Rádio digital	22
2.2	Representação de imagens digitais	22
2.2.1	Imagens em Escalas de Cinza	22
2.2.2	Imagens Coloridas	23
2.3	Espaço de cores	25
2.4	Resolução	26
2.5	Mudança de Resolução	27
2.5.1	Ferramenta utilizada para mudança de resolução	27
2.6	Compressão de imagens	28
2.6.1	Compressão JPEG	29
2.6.2	Compressão H264/AVC	30
2.7	Medidas de qualidade	32
3	METODOLOGIA ADOTADA	34
3.1	Abordagem do problema	34
3.2	Método proposto para redução do tempo gasto	39
3.3	Interpolações	40
3.4	Desenvolvimento do algoritmo	43
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
4.1	Desempenho alcançado	46
4.2	Transmissões realizadas em ondas curtas	48
4.2.1	Servidor de Conteúdo	48
4.2.2	Sistema de Transmissão	49
4.2.3	Sistemas de Recepção	52
4.3	Aplicação do programa desenvolvido	55
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	58

Referências	60
APÊNDICES	62
APÊNDICE A – INTERPOLAÇÕES	63
APÊNDICE B – RESULTADOS	71
APÊNDICE C – IMAGENS VISTAS NO RECEPTOR	82
ANEXOS	88
ANEXO A – IMAGENS UTILIZADA PELA COMUNICADA CI- ENTÍFICA	89

1 Introdução

1.1 Contextualização e Justificativa

Em 2010, o Brasil, por meio do Ministério das Comunicações, instituiu as premissas do Sistema Brasileiro de Rádio Digital, visando à operação eficiente do serviço de radiodifusão sonora tanto em Ondas Médias (OM) quanto em Frequência Modulada (FM) ([SILVA, 2010](#)). Para cada faixa de frequência existem vários sistemas proponentes, que devem ser analisados sob diversos aspectos antes de uma escolha, ou não, pelo governo brasileiro. Além dos serviços em OM e em FM, há emissoras operando nas faixas de Ondas Tropicais (OT) e Ondas Curtas (OC), que, apesar de serem em número bem reduzido no país, podem optar pela digitalização também. Porém, para a faixa de ondas curtas só existe um sistema desenvolvido, denominado Digital Radio Mondiale – DRM (ETSI ES 201 980, 2003), para o qual a União Internacional de Telecomunicações recomenda a sua adoção por todos os países (ITU, 2013).

As emissoras em ondas curtas – OC ganharam nova relevância mundial com a digitalização, parte em função de novos serviços e aplicações disponíveis, tais como o seu uso em sistemas de prevenção e alerta de emergências, do qual o projeto International Radio for Disaster Relief (IRDR) é um exemplo. O impacto da digitalização das ondas curtas é maior ainda devido às características de propagação nessa faixa de frequência, que permite áreas de coberturas nacionais e transcontinentais por meio de uma única emissora, e principalmente por estarem mais propícias aos ruídos e aos desvanecimentos, que não são possíveis de ser tratados em uma transmissão analógica, mas que na transmissão digital seus efeitos são minimizados na recepção. No entanto, a largura de banda disponível nessa faixa de frequência não é suficiente para proporcionar as altas taxas de transmissão de dados que são praticadas em outros meios de comunicação, tais como a internet em banda larga, o que torna mais cuidadosa transmissão de conteúdo para esse tipo de tecnologia ([SANTOS, 2014](#)).

Diante dessa nova perspectiva da utilização da faixa de ondas curtas, é necessário que se desenvolvam pesquisas para transmissão de conteúdos multimídia utilizando largura de banda estreita, principalmente visando economia de energia na decodificação dos dados referentes as imagens, dado que devido à grande área de cobertura do serviço, uma parcela significativa dos usuários desse serviço se encontra em regiões isoladas de energia elétrica.

Portanto, esse trabalho tem como objetivo desenvolver um algoritmo que possibilita a redução do gasto de energia elétrica para a decodificação de imagens em receptores de rádio digital na faixa de Ondas Curtas.

Para verificar a eficiência do algoritmo desenvolvido, foram realizados testes práticos, utilizando uma plataforma de baixo custo composta por um transmissor de baixa potência utilizando o Spark DRM-Modulator ([FEILEN M.SC., 2005](#)) e um receptor comercial juntamente com um receptor via pendrive que funciona através de Rádio Definido por Software – SDR (Software Defined Radio) ([MOTTA, 2013](#)).

1.2 Objetivo Geral

Assim, o objetivo geral deste trabalho é reduzir gastos de energia elétrica nos receptores de rádio digital portáteis em onda curtas, dentro da banda disponível, com perda de qualidade da imagem imperceptível ao ser humano.

1.3 Objetivo Específico

1. Neste contexto, o objetivo específico é:

- a) desenvolver um algoritmo que reduza a complexidade de decodificação de imagens recebidas no receptor portátil digital de rádio em ondas curtas, através da redução de resolução das mesmas, sem perda significativa de qualidade, utilizando redimensionamento baseado na transformada discreta de cossenos (DCT), conforme método proposto por Carlos Salazar;
- b) realizar testes de qualidade de imagem que permita verificar a taxa em bits por pixel;
- c) estimar o ganho de energia por meio do tempo gasto durante o processo de decodificação.

1.4 Escopo da Dissertação

Dentro da abordagem descrita, no Capítulo 2, será feita uma revisão bibliográfica dos itens mais importantes para este trabalho: transmissão de rádio digital, representação de imagens digitais, espaço de cores, mudança de resolução de imagem, compressão de imagens e medidas de qualidade. No Capítulo 3, a metodologia adotada será apresentada. No Capítulo 4, serão apresentadas as discussões dos resultados experimentais para validação do método apresentado. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e considerações finais deste trabalho.

2 Referencial Teórico

2.1 Transmissão de Rádio digital

No Brasil, todas as transmissões de rádio com a modulação AM/FM são analógicas. Devido ao interesse público de digitalizar o rádio, o Ministério das Comunicações publicou o chamamento público nº 1/2011, com o objetivo de efetuar testes e avaliar os sistemas de radiodifusão sonora digital (SILVA, 2011). Muitos países da Europa já adotaram a tecnologia, permitindo qualidade de áudio com a modulação AM equivalente à modulação FM analógica, e com modulação FM equivalente ao CD (Compact Disk) (NEVES, 2006).

O consórcio DRM *Digital Radio Mondiale* é o único sistema que transmite o rádio digital em ondas curtas. A tecnologia usada para esta finalidade é o DRM30. O sistema permite transmitir por meio de uma portadora de 30 MHz as seguintes larguras de bandas: 4,5 kHz, 5 kHz, 9 kHz, 10 kHz, 18 kHz ou 20 kHz (DRM, 2014). Caso o sistema seja adotado no Brasil, ele operará com a largura de banda de 10 kHz, que será utilizada para transmitir áudio e imagens. Havendo interesse público, podem-se criar mecanismos para promover a inclusão social, pois com esta banda é possível transmitir páginas em HTML e fornecer arquivos digitais de tamanhos pequenos (DRM, 2014). Para atender as comunidades que são usuárias do serviço em ondas curtas, este meio poderá oferecer de forma bastante satisfatória materiais educativos como exercícios, textos e slides contendo algumas imagens. Sendo assim, vejamos como imagens digitais são representadas.

2.2 Representação de imagens digitais

Do ponto de vista matemático, um canal é formado por uma matriz, e cada elemento desta matriz é denominado *pixel* do inglês *Picture Element*. Cada *pixel* é uma unidade no processo de formação de uma imagem digital e pode variar de acordo com a quantidade de bits de representação

2.2.1 Imagens em Escalas de Cinza

No processo de formação de imagens monocromáticas de N bits, a intensidade de cada pixel (*Picture Element*) varia entre 0 e $2^N - 1$, onde 0 representa a ausência de cor, o preto, e o valor $2^N - 1$ representa a cor branca. As figuras em uma imagem surgem conforme as mudanças de intensidades de cada pixel. Neste tipo de imagem o padrão de luminância é representada pela função descrita abaixo (GONZALEZ, 2008):

$$l = f(x, y) \quad (2.1)$$

$$Lmin \leq l \leq Lmax \quad (2.2)$$

Neste modelo matemático os valores compreendidos entre $Lmin$ (0) e $Lmax$ ($2^N - 1$) são identificados com níveis de escalas de cinza. Os processos de discretização das coordenadas e da amplitude são chamados de amostragem e quantização, respectivamente (GONZALEZ, 2008). Cada coordenada (x,y) da função $f(x,y)$ representa a localização geométrica de cada pixel, e a amplitude são os níveis de escala de cinza.

2.2.2 Imagens Coloridas

As imagens coloridas podem ser compostas por três canais primários de cores: vermelho, verde e azul (RGB, do inglês *Red*, *Green* e *Blue*). Ou seja, no processo de formação de uma imagem com o padrão de cores RGB, cada imagem é construída através da combinação das cores vermelha, verde e azul, dando origem a um grande número de tonalidades de cores (RICHARDSON, 2003).

Para uma definição com 8 bits de resolução, têm-se 256 tonalidades na mesma matiz correspondente a mesma cor. Por exemplo, a Fig. 1 apresenta uma imagem composta pelos canais RGB, e a Fig. 2 apresenta somente o canal que representa a cor verde da Fig. 1. Ou seja, o canal correspondente às cores vermelha e azul tiveram toda suas intensidades reduzidas à zero. Em seguida, a Fig. 3 apresenta uma amostra de 10 x 10 pixels do canal referente à cor verde, e a Fig. 4 apresenta a forma matricial numérica da Fig. 3.

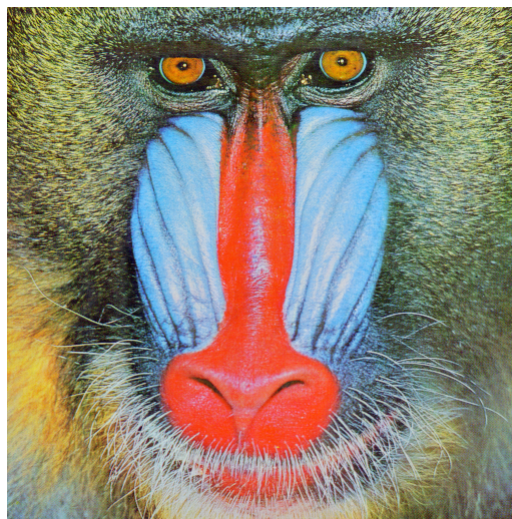


Figura 1 – Imagem original composta por três canais de cores com o tamanho de 512×512 pixels



Figura 2 – Representação apenas do canal verde com o tamanho de 512×512 *pixels*



Figura 3 – Trecho de tamanho 10×10 *pixels*

$$M = \begin{bmatrix} 35 & 23 & 17 & 18 & 38 & 58 & 55 & 51 & 47 & 35 \\ 83 & 60 & 91 & 72 & 93 & 91 & 100 & 95 & 65 & 103 \\ 125 & 132 & 133 & 112 & 131 & 121 & 115 & 112 & 104 & 131 \\ 113 & 132 & 118 & 117 & 111 & 121 & 99 & 90 & 113 & 79 \\ 120 & 103 & 119 & 102 & 100 & 90 & 101 & 63 & 75 & 83 \\ 94 & 92 & 77 & 90 & 84 & 56 & 56 & 74 & 84 & 85 \\ 102 & 103 & 56 & 51 & 27 & 22 & 34 & 36 & 43 & 48 \\ 97 & 64 & 30 & 21 & 30 & 21 & 31 & 61 & 84 & 49 \\ 63 & 31 & 10 & 21 & 29 & 27 & 45 & 203 & 222 & 179 \\ 33 & 25 & 17 & 21 & 29 & 37 & 86 & 219 & 225 & 181 \end{bmatrix}$$

Representação numérica da matriz correspondente à Figura 3.

No processo de captura de imagem de uma câmera digital, existem sensores responsáveis por captar individualmente comprimentos de ondas correspondentes às cores vermelha, verde e azul. Neste processo, naturalmente existem perdas de dados de uma imagem real, como ilustrado na Fig.6. Esta ideia surgiu originalmente devido ao processo de captura existente na época, onde os sensores captavam apenas imagens em nível de cinza. Devido a este fato, em 1976 foi registrada uma patente por Bryce Bayer que idealizou filtros para visualização das cores vermelha, azul e verde, com o intuito de solucionar

o problema nos sensores que só identificavam níveis de cinza, possibilitando fotos com imagens coloridas. Esse processo ficou conhecido como Padrão Bayer e é caracterizado por interpolações realizadas com pontos na vizinhança do ponto alvo resultado do cálculo da média destes pontos. Por exemplo, para uma região de 3×3 *pixels*, tem-se 5 *pixels* verdes, 2 *pixels* azuis e 2 *pixels* vermelhos, ou 4 *pixels* verdes, 1 *pixel* azul e 4 *pixels* vermelhos. Para se obter a componente de cor verde em uma posição em que ela não foi captada, pode-se calcular a média aritmética dos *pixels* verdes adjacentes, e da mesma forma para as posições não captadas nas componentes vermelha e azul. Cabe esclarecer que existem outros tipos de interpolações mais sofisticadas para esta tarefa.

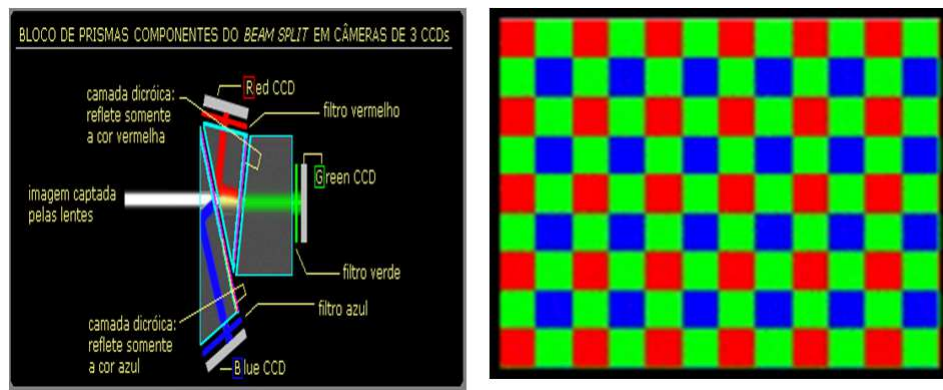


Figura 4 – Processo de captura de uma câmera fotográfica. <www.fazendovideo.com.br>

Sequências de vídeo são formadas por um conjunto de imagens amostradas em intervalos regulares. Devido a um efeito conhecido como persistência da visão, os seres humanos não percebem a transição entre quadros exibidos com velocidades acima de 24 quadros por segundo (MACHADO, 2007).

2.3 Espaço de cores

Uma imagem digital colorida pode ser representada em diferentes formas além do formato RGB, de maneira a refletir outras de suas características. A luminância de uma imagem, por exemplo, é a quantidade de energia percebida por um observador dada uma fonte luminosa, desde que, a faixa de cores esteja dentro do espectro de radiação restrita (GONZALEZ, 2008). Esta energia é representada pela variação dos níveis de cinza de uma imagem. A cromaticidade, por sua vez, representa as componentes de cores de uma imagem. Como o sistema visual humano é mais susceptível às variações de luminância do que às de cromaticidade, pode-se reduzir a quantidade de dados na representação da cromaticidade sem afetar a qualidade subjetiva de uma imagem para um observador.

Para definir este espaço de cores, foram desenvolvidos modelos matemáticos capazes de separar características de uma imagem relacionadas às componentes de luminância

e de cromaância, respectivamente. Embora existam outros padrões para representar imagens coloridas, o foco do trabalho foi o padrão YUV. A técnica consiste em converter uma imagem de padrão RGB para o formato YUV, cujo processo de conversão é atualmente recomendado pela resolução ITU-R BT.601-7 (BT.601-7, 2007). O processo ocorre da seguinte maneira: o quadro é subdividido em canais de cores vermelha (R), verde (G) e azul (B) e os novos canais de luminância (Y), cromaância azul (Cb) e cromaância vermelha (Cr) são obtidos a partir das fórmulas a seguir:

$$Y = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B \quad (2.3)$$

$$Cb = 0.564 * (B - Y) \quad (2.4)$$

$$Cr = 0.713 * (R - Y) \quad (2.5)$$

O processo pode ser revertido conforme descrito nas formulas abaixo:

$$R = Y + 1.402 * Cr \quad (2.6)$$

$$G = Y - 0.344 * Cb - 0.714 * Cr \quad (2.7)$$

$$B = Y + 1.772 * Cb \quad (2.8)$$

Se a quantidade de pixels que compõem a resolução da imagem correspondente à luminância (Y), à cromaância vermelha (Cr) e à cromaância azul (Cb) for igual, tem-se o formato 4:4:4 onde as principais perdas são consequências de arredondamentos numéricos. Mantendo a mesma coerência lógica, quando se reduz a resolução das componentes referentes às cromaâncias para metade da componente de luminância, o formato obtido é o 4:2:2. E, por fim, ao se reduzir as componentes de cromaâncias em ambas as dimensões em um quarto da componente de luminância é gerado o formato 4:2:0. Nesse trabalho está sendo utilizado o formato 4:2:2.

2.4 Resolução

Resolução é um termo muito difundido na área de processamento de imagens, além de aparecer em outras áreas do conhecimento. Devido ao fato do conceito ser amplo e não possuir uma definição precisa, em processamento de imagens, pode-se associar resolução de uma imagem ao tamanho da mesma em pixels. Já o termo resolução espacial refere-se ao menor detalhe discernível em uma imagem; por exemplo, o menor número de pares de linhas discerníveis por unidade de distância (GONZALEZ, 2008). A resolução temporal é

definida pela quantidade de quadros presentes em um espaço de tempo para uma sequência de imagens referentes a uma cena. Se amostrada com um mínimo de 24 quadros por segundo, atinge-se uma impressão de movimento mais natural para o observador humano (MACHADO, 2007).

2.5 Mudança de Resolução

O processo de mudança da resolução espacial de uma imagem consiste em alterar a quantidade de *pixels* para representar um determinado quadro. Por exemplo, a redução de resolução pode ser alcançada removendo linhas e colunas alternadas da imagem original. Ao se remover colunas ou linhas de uma imagem, as transições na imagem ficam mais abruptas, causando *aliasing* (GONZALEZ, 2008). Sendo assim, há necessidade de utilizar filtros digitais anti-aliasing, para depois aplicar uma interpolação para suavizar as transições, melhorando a qualidade da imagem e minimizando os efeitos causados pelo *aliasing*. Processo semelhante acontece para o aumento de resolução da imagem, onde valores nulos são inseridos entre linhas e colunas alternadas da imagem original, seguido de interpolação dos pixels para suavizar as transições.

2.5.1 Ferramenta utilizada para mudança de resolução

No processo de compressão de uma imagem, é necessário identificar as informações redundantes ou pouco perceptíveis aos olhos humanos. Neste contexto, é notória a importância do uso de uma ferramenta matemática capaz de descorrelacionar os *pixels* adjacentes contidos em uma imagem para melhor distinguir as informações imperceptíveis aos olhos. Para solucionar esse problema, existe uma manipulação matemática denominada Transformada Discreta do Cosseno (DCT) (RICHARDSON, 2003). Quando se retira uma matriz de dimensão 8x8 de uma imagem e aplica-se a DCT, os valores constantes do bloco são passados para o domínio da frequência. Nessa situação, componentes de baixa frequência e alta energia têm a tendência de se concentrar no canto superior esquerdo da matriz, em determinados tipos de imagens. Deste modo, os pontos de menores intensidades e alta frequência podem ser tratados de forma que, na reconstrução da imagem, as perdas não sejam perceptíveis. O modelo matemático está descrito nas equações abaixo:

$$Y = AXA^T \quad (2.9)$$

$$X = A^T Y A \quad (2.10)$$

onde as componentes A_{ij} das matrizes A são calculados da seguinte forma (RICHARDSON, 2003):

$$A_{ij} = C_i \cdot \cos \frac{(2j+1) \cdot i \pi}{2 \cdot N}, \text{ onde} \quad (2.11)$$

$$C_i = \sqrt{\frac{1}{N}} (i = 0), C_i = \sqrt{\frac{2}{N}} (i > 0) \quad (2.12)$$

Escrevendo na forma bidimensional, a expressão pode ser obtida da seguinte forma:

$$Y_{xy} = C_x \cdot C_y \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} X_{ij} \cdot \cos \frac{(2j+1) \cdot y \pi}{2N} \cdot \cos \frac{(2i+1) \cdot x \pi}{2N} \quad (2.13)$$

$$X_{ij} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} C_x \cdot C_y \cdot Y_{xy} \cdot \cos \frac{(2j+1) \cdot y \pi}{2 \cdot N} \cdot \cos \frac{(2i+1) \cdot x \pi}{2N} \quad (2.14)$$

De maneira geral, nos algoritmos de compressão de imagem, esta ferramenta é muito utilizada. A característica principal é agrupar informações referentes à imagem que possam ser descartadas de maneira que a degradação na qualidade da imagem seja pouco perceptível (FILHO OGÊ VIEIRA NETO, 1999). Contudo, na proposição do método alvo deste trabalho, existem alguns detalhes que serão mencionados na seção 3.1 na análise da equação matemática enunciada.

2.6 Compressão de imagens

O processo de compressão consiste em reduzir dados referentes a um arquivo digital, permitindo a transmissão com o menor número possível de bits e o armazenamento de maior quantidade de informação (FILHO OGÊ VIEIRA NETO, 1999). A compressão se baseia principalmente na remoção de informações redundantes de um arquivo digital. Em algumas literaturas, os conceitos de compactação e compressão são diferenciados. Quando as informações são reduzidas sem causar perdas, ou seja, toda a informação original é preservada, o processo é conhecido como compactação. Quando parte da informação é irreversivelmente perdida, este processo é conhecido como compressão (FILHO OGÊ VIEIRA NETO, 1999).

Dentre os métodos de compactação sem perdas, têm-se os codificadores de entropia, tais como o algoritmo RLE (*run-length encoding*) e os códigos de Huffman. O RLE identifica sequências de símbolos repetidos, verifica a quantidade dos mesmos e envia um código que representa o símbolo e a quantidade de repetições do mesmo. Já o código de Huffman analisa a probabilidade de ocorrência dos símbolos, atribuindo códigos com menos bits para os símbolos que surgem com maior frequência. Existem outros códigos com o mesmo princípio, tais como Goulomb, exp-Goulomb, etc. ao aplicação do código de Huffman é vantajosa quando as probabilidades dos símbolos são potências de 2 (ou seja, 1/2, 1/4, 1/8, etc.) (PENNEBAKER; MITCHELL, 1993).

No processo de compactação de imagens, cada imagem permite uma capacidade de redução da informação diferente. De acordo com a teoria matemática de comunicações, enunciada por Shannon, cada fonte de informação tem um grau de entropia que identifica qual a máxima compressão de dados que aquela fonte pode sofrer (SHANNON, 1948). Imagens com índices de correlação muito grandes entre as vizinhanças de cada pixel facilitam a compressão.

2.6.1 Compressão JPEG

O padrão JPEG é uma técnica desenvolvida para trabalhar exclusivamente com imagens recomendada pela UIT (União Internacional de Telecomunicações) (T81, 1992). É bastante utilizado em máquinas fotográficas, *scanners*, páginas da internet e nas imagens transmitidas pelo rádio digital. O algoritmo trabalha tanto com imagens monocromáticas quanto com imagens coloridas. Nesta seção, será descrito o funcionamento geral do JPEG.

O processo de compressão JPEG está representado no diagrama de compressão/descompressão abaixo, onde está indicada cada etapa do processo de compressão, assim como do processo de descompressão (KHALID, 2006).

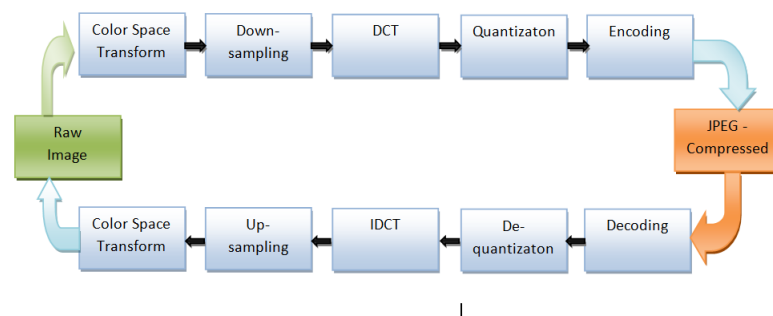


Figura 5 – Fluxograma referente a parte de compressão e descompressão JPEG

Color Space Transform: esta etapa se refere à técnica de mudança de espaço de cores, descrita na Seção 2.2. O algoritmo codifica cada componente do espaço de cores separadamente.

Downsample: o intuito deste processo é reduzir as componentes de cromaticidade em 50%, tendo em vista que a visão humana percebe melhor as variações de luminância.

Discrete Cosine Transform (DCT): esta etapa separa as baixas e as altas frequências da imagem, pois as informações em determinados tipos de imagens contidas em alta frequência são pouco perceptíveis à visão humana.

Quantization: após o resultado da DCT, os valores correspondentes são divididos por coeficientes X_{ij} pré-definidos, para a realização da quantização. Esta divisão depois

é arredondada para um valor inteiro. Neste quesito, ocorrem perdas de informações por efeito de arredondamentos (PENNEBAKER; MITCHELL, 1993).

Encoding: o estágio de codificação utiliza o código Huffman para realizar a compressão sem perdas. Este tipo de algoritmo trabalha com uma sequência unidimensional de dados, ou seja, antes da sua execução é necessário um procedimento anterior denominado *zig-zag scan order* (RICHARDSON, 2003). Este processo consiste em transformar uma matriz de duas dimensões em um vetor ordenado, indo de pontos com componentes de baixas para altas frequências. Esta ordenação permite ao código de Huffman compactar melhor as informações, tendo como base a possibilidade de recorrências de termos. Quando maior a quantidade de informações redundantes, menor o *bitrate*, implicando em redução mais acentuada de dados.

Decoding: o decodificador recebe o *bitstream* juntamente com um mapa de codificação. Com base nestas informações, é possível retomar o processo antes da codificação de Huffman.

De-quantization: conforme o nome indica, este é o processo dual da quantização, embora não seja um processo reversível. Cada índice da DCT foi previamente dividido por um coeficiente X_{ij} , e, nesta ocasião, ele será multiplicado pelo mesmo coeficiente.

Inverse Discrete Cosine Transform (IDCT): aplicando-se este processo sobre a matriz resultante do processo anterior, retorna-se a um padrão adequado à visualização original, mas ainda assim diferente da imagem original.

Up-sample: retorna a imagem para o tamanho original. Ou seja, retorna o tamanho das componentes de cromaticidade para o tamanho original da imagem, que será convertido para o espaço de cores RGB, possibilitando a visualização da imagem.

Na realidade, todo o processo nunca voltará à imagem original, porque informações foram perdidas no decorrer do processo. Resta esclarecer que todo o processo visa retirar informações que não são perceptíveis aos olhos humanos. Porém, quando o objetivo é reduzir rigorosamente a imagem, as perdas são claramente perceptíveis. O JPEG possui graus de redução de qualidade controlados, onde o usuário pode escolher qual é a melhor qualidade que atenderá adequadamente à aplicação escolhida.

2.6.2 Compressão H264/AVC

O padrão H264/AVC foi desenvolvido pelo *Video Experts Group* (VCEG) que pertence à ITU-T e pela equipe do *Moving Picture Experts Group* (MPEG) da ISO/IEC. A concepção do padrão é para vídeo, embora, não existam restrições para ser utilizado em imagens. As aplicações comuns são na área de videoconferência, televisão digital, cinemas digitais, entre outras. Além de permitir o armazenamento de vídeos em *DVDs* e especialmente vídeos de alta resolução (SULLIVAN PANKAJ TOPIWALA, 2004). Para

compreender melhor o processo, seu funcionamento será descrito de modo geral.

Este algoritmo também é baseado na DCT, só que, diferente do JPEG, este pode ser usado tanto para imagem quanto para vídeo. A codificação de entropia utilizada é o CABAC - *context-based arithmetic coding*, ou codificação aritmética baseada em contextos. Assim como no JPEG, será disposto o diagrama do funcionamento do algoritmo e discutido os blocos à parte (RICHARDSON, 2003).

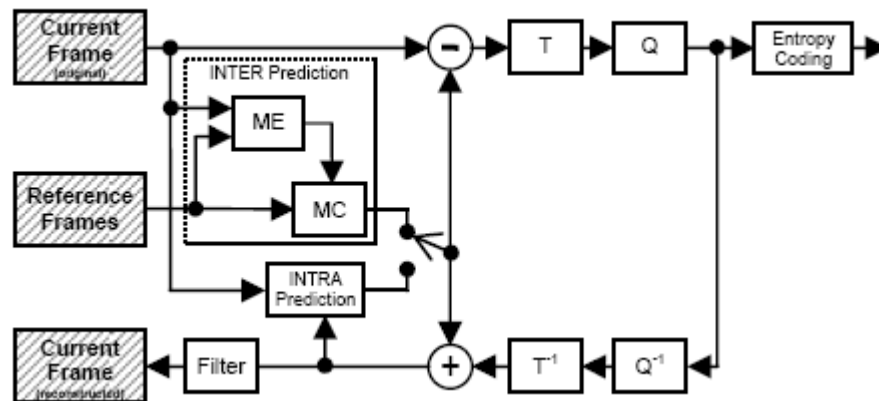


Figura 6 – Diagrama de blocos do codificador H.264/AVC (RICHARDSON, 2003)

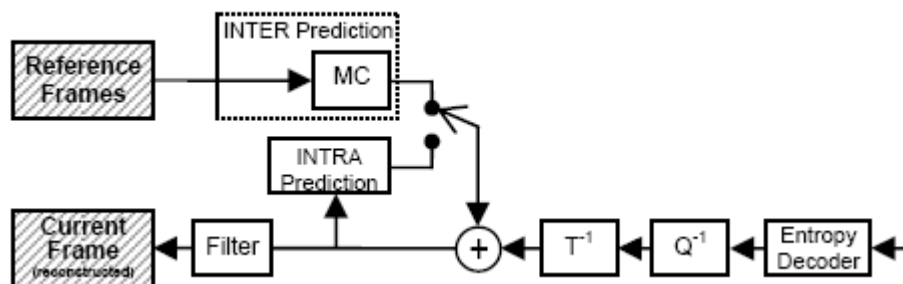


Figura 7 – Fluxograma do decodificador H264 (RICHARDSON, 2003)

Predição: É o processo utilizado para diminuir a redundância entre quadros vizinhos (inteiros ou parte deles) para prever o quadro atual baseado nos quadros anteriores codificados e reconstruídos (HUNG, 2007).

Estimação de Movimento(ME):Esta função foi desenvolvida com objetivo de localizar em um quadro já transmitido um bloco semelhante ao bloco da imagem a ser codificada aparece.

Compensação de Movimento(MC): É a aplicação dos vetores de movimento nos quadros de referência de modo a gerar uma predição do quadro (ou slice ou bloco) atual (HUNG, 2007).

Depois de realizada a predição, a imagem gerada passa por uma transformada baseada na DCT, seguida da ordenação feita pelo *zig-zag scan order* e pelo codificador de entropia CABAC. Concluídas estas etapas, é gerado um arquivo com a extensão .264, com uma taxa muito reduzida em relação à taxa da imagem original, mas com qualidade degradada em relação à mesma.

2.7 Medidas de qualidade

Processos como a mudança de resolução de imagens e a compressão com perdas acarretam erros na representação das mesmas. Para medir a qualidade da imagem, existem métodos que precisam de uma imagem de referência e métodos que não precisam. As análises que são adotadas nos conselhos técnicos da UIT são subjetivas e objetivas (J.247, 2008). A análise subjetiva se refere à avaliação, por pessoas leigas no assunto e em um ambiente controlado, de imagens degradadas, de acordo com critérios recomendados pela UIT (União Internacional de Telecomunicações) (J.247, 2008). No ambiente preparado, as pessoas precisam estar a uma distância específica da tela e localizadas a ângulos pré-determinados. De acordo com os resultados obtidos é levantada uma curva do índice MOS (*Mean Opinion Score*) que representa a nota média das opiniões dos telespectadores, onde valores maiores que 3,5 são considerados subjetivamente aceitáveis. Análises objetivas de qualidade utilizam métricas calculadas matematicamente para definir o grau de degradação de uma imagem. Os métodos objetivos mais comumente utilizados são a PSNR e o SSIM.

A PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) mede a relação entre o ruído (ou degradação) e o máximo sinal possível em uma imagem. Para uma imagem original X em 8 *bits* e de tamanho $m \times n$ e sua versão degradada Y , a PSNR entre X e Y é dada por (J.247, 2008):

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [yr(i, j) - yc(i, j)]^2; \quad (2.15)$$

$$PSNR = 10 \log\left(\frac{255^2}{MSE}\right); \quad (2.16)$$

O SSIM (*Structural Similarity Index*, ou índice de similaridade estrutural) é outro método para medir objetivamente a qualidade entre as imagens. Os valores são dados em escalas entre 0 e 1, que representam respectivamente mínima e máxima qualidade no processo de comparação entre duas imagens. As fórmulas para esta métrica são:

$$SSIM(X, Y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C1)(2\sigma_{xy} + C2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C2)}; \quad (2.17)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (xi - \mu_x)(yi - \mu_y) \quad (2.18)$$

$$C1 = (k1 * L)^2; \quad (2.19)$$

$$C2 = (k2 * L)^2; \quad (2.20)$$

- μ_x , Valor médio da imagem X;
- μ_y , Valor médio da imagem Y;
- L, faixa dinâmica dos valores de pixels (255 por 8 *bits* de escala de cinza);
- k1 e k2, são constantes de ajustes que assumem valores menores que 1;
- σ_{xy} , correlação entre as amostras da imagem de referência e de comparação, ambas subtraídos das suas respectivas médias;
- σ_x , variância da imagem X;
- σ_y , variância da imagem Y.

3 Metodologia Adotada

O presente trabalho consiste em reduzir a resolução da imagem, de modo que a imagem possa ser decodificada com maior rapidez no receptor de rádio digital, economizando energia nesse equipamento. Esta redução de resolução acarreta em uma diminuição da quantidade de bits transmitidos, aumentando a taxa de compressão, o que incorre em queda na qualidade objetiva da imagem após a sua decodificação e posterior aumento da resolução da imagem descompactada. Esta diferença de qualidade objetiva deve ser suficientemente pequena para que o sistema seja viável. Para executar esse trabalho, foram utilizadas as técnicas de mudança de resolução de imagens, baseada no método de Carlos Salazar, e algoritmos de compressão de imagens tais como JPEG e H.264/AVC. Implementado o projeto proposto, diversas imagens comumente utilizadas pela comunidade científica são testadas para comprovar a sua eficiência. Para realizar essa análise, foram usadas as curvas de qualidade objetiva em PSNR referenciadas ao tempo gasto pela decodificação de cada imagem em função da taxa de transmissão. Com os parâmetros extraídos da curva, é possível validar a qualidade da imagem digital objetivamente. Quanto menor a resolução da imagem com o mínimo de perda na qualidade objetiva, maior será a economia de energia nos rádios digitais.

3.1 Abordagem do problema

Primeiramente, a meta é reduzir a resolução de uma imagem qualquer removendo informações em alta frequência, e em seguida ampliar a imagem inserindo altas frequências extras nulas. Para alcançar este objetivo foi utilizado um algoritmo (SALAZAR; TRAN, 2005), conforme os diagramas de bloco na Fig. 8, capaz de executar a lógica descrita com desempenho melhor que as interpolações clássicas como *nearest-neighbour*, *bilinear* e *bicúbica*. Este algoritmo utiliza a DCT para separar as frequências que são removidas para a redução da resolução.

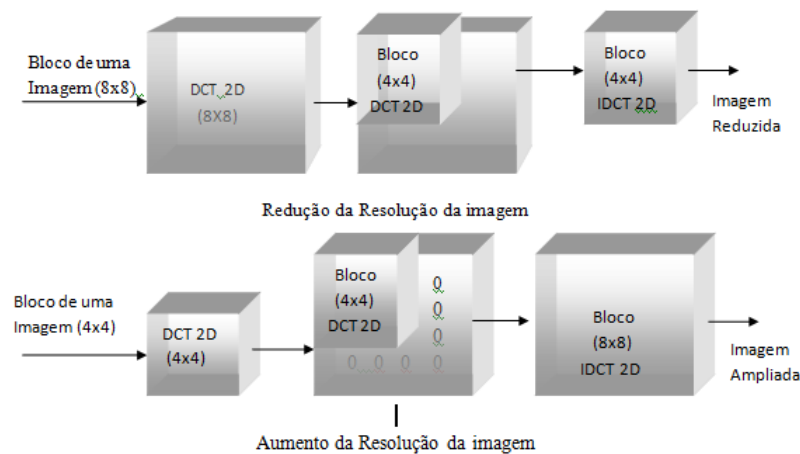


Figura 8 – Processo de DownSample/UpSample (SALAZAR; TRAN, 2005)

Para reduzir a complexidade do algoritmo, a mudança de resolução é feita sobre cada bloco da imagem de entrada. Sendo assim, torna-se necessário que as linhas e colunas da imagem sejam múltiplas do tamanho do bloco. Em imagens que não têm estas características, é preciso completar as matrizes numéricas correspondentes às imagens com informações digitais pertinentes de forma a não degradar a formação da imagem.

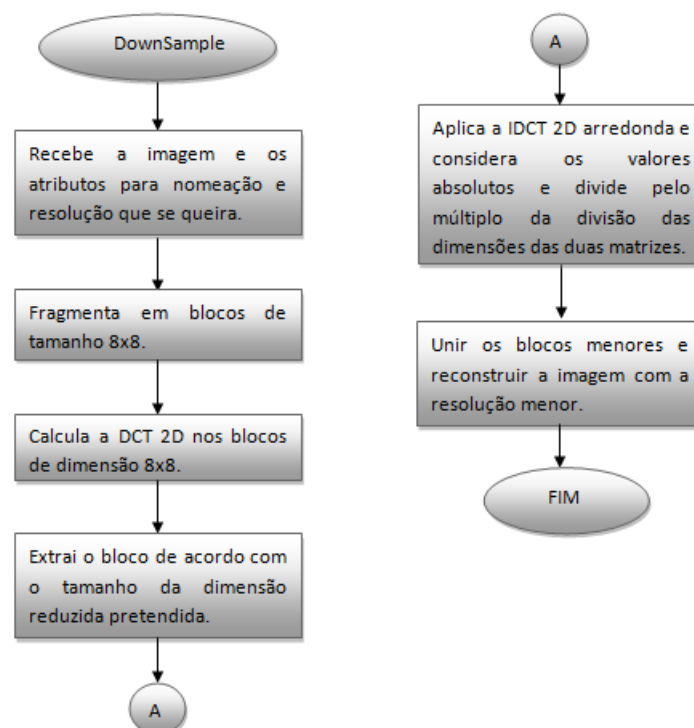


Figura 9 – Algoritmo proposto para DownSample

No desenvolvimento do algoritmo definido (SALAZAR; TRAN, 2005), percebe-se que são calculadas DCTs diretas e inversas de tamanhos diferentes, de forma que a imagem

de saída adquire um padrão de luminosidade diferente da imagem original. Isto pode ser explicado através das equações que geram a matriz de coeficientes da DCT.



Figura 10 – Alteração da imagem extraída do <www.travlang.com>

Sabe-se que a equação correspondente à matriz de transformadas (A_{ij}) DCT é expressa (RICHARDSON, 2003):

$$A_{ij} = C_i \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \cdot \cos \frac{(2j+1) \cdot i \pi}{2 \cdot N} \quad (3.1)$$

sendo que i , j , e N correspondem respectivamente ao número da linha, da coluna e ao tamanho da matriz. Esta DCT é definida para ser aplicada sobre um vetor de tamanho $N \times 1$. Como a imagem é composta por vários blocos, esta DCT seria aplicada somente sobre as linhas de cada bloco. Seguindo o mesmo raciocínio para as colunas dos blocos, tem-se:

$$A_{ji} = C_j \cdot \sum_{j=0}^{M-1} \cdot \cos \frac{(2i+1) \cdot j \pi}{2 \cdot M} \quad (3.2)$$

Desta forma, M seria a quantidade de colunas de uma matriz de tamanho qualquer. Os valores de amplitude podem ser estabelecidos conforme a definição abaixo:

$$C_i = \sqrt{\frac{1}{N}}, i = 0 \text{ ou } \sqrt{\frac{2}{N}}, i > 0. \quad (3.3)$$

$$C_j = \sqrt{\frac{1}{M}}, j = 0 \text{ ou } \sqrt{\frac{2}{M}}, j > 0. \quad (3.4)$$

Com os coeficientes descritos, pode-se enunciar a transformada discreta do cosseno (DCT) em 1 dimensão aplicada na direção horizontal de uma imagem qualquer da seguinte maneira:

$$f(x) = C_i \cdot f(h) \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \cdot \cos \frac{(2j+1) \cdot i\pi}{2N} \quad (3.5)$$

E na direção vertical:

$$f(y) = C_j \cdot f(v) \cdot \sum_{j=0}^{M-1} \cdot \cos \frac{(2i+1) \cdot j\pi}{2M} \quad (3.6)$$

Fazendo a combinação das duas funções independentes, o resultado é a transformada discreta do cosseno (DCT) em duas dimensões, sendo que quando o intuito é trabalhar com matrizes quadradas, basta igualar o número de linhas com o de colunas:

$$f(x, y) = C_i \cdot C_j \cdot f(h, v) \cdot \sum_{j=0}^{N-1} \cdot \cos \frac{(2i+1) \cdot j\pi}{2M} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \cdot \cos \frac{(2j+1) \cdot i\pi}{2N} \quad (3.7)$$

Quando se quer obter a transformada inversa do cosseno (IDCT) em duas dimensões, aplica-se a seguinte equação:

$$f(h, v) = C_i \cdot C_j \cdot f(x, y) \cdot \sum_{j=0}^{N-1} \cdot \cos \frac{(2i+1) \cdot j\pi}{2M} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \cdot \cos \frac{(2j+1) \cdot i\pi}{2N} \quad (3.8)$$

Ambas as formas têm as correspondências nas seguintes formas matriciais, ou seja, a transformada em 2 dimensões é $Y = AXA^T$ sendo que $Y=AX$ é a transformada discreta do cosseno em 1 dimensão, e a transformada inversa é $X=A^T Y A$ sendo que $X= A^T Y$ é a transformada inversa em 1 dimensão. Portanto pode-se afirmar que $A = A_{ij}$ e $A^T=A_{ji}$ conforme as definições formais.

Percebe-se, pelas equações descritas acima, que C e C_j são fatores cujo produto determina a amplitude dos valores numéricos da matriz resultante da transformada, conforme demonstrada nas situações descritas abaixo:

$$C_i \cdot C_j = \frac{1}{N} \cdot f, i = 0 \text{ ou } \frac{2}{N} \cdot f, i > 0. \quad (3.9)$$

Ou seja, numa matriz quadrada o valor de N determina a amplitude das DCTs direta e inversa, conforme a linha de raciocínio encadeada acima. Por exemplo, quando se aplica a DCT de duas dimensões em uma matriz de tamanho 8x8 e em seguida aplica-se a transformada inversa em uma matriz de tamanho 4x4, extraída da transformada da matriz

de 8×8 , matematicamente a matriz menor terá nestas condições o dobro da amplitude devido ao produto das amplitudes dos cossenos conforme demonstrado na equação 3.8. Neste contexto, reflete a intensidade da matriz de cores que resultará para o sistema visual humano (SVH) a sensação de maior luminosidade (GONZALEZ, 2008). Ou seja, a imagem fica mais clara, vide figura 10. Para corrigir esta diferença na imagem reduzida é preciso criar um fator de ajuste que é igual à razão entre o tamanho das duas matrizes DCT, que no caso citado neste parágrafo é $8/4 = 2$.

Contudo, alguns cuidados precisam ser tomados quando a imagem é restaurada para o tamanho original. As amplitudes dos cossenos, conforme mostrado na equação 3.8, são estabelecidas em função da linha e da coluna de uma imagem. Quando a imagem aumenta, a amplitude de cada pixel diminui, porque são inversamente proporcionais às dimensões da imagem. Este fato implica em diminuição da luminosidade da imagem. Esta consequência é facilmente reversível quando o número de linhas e colunas permitem divisões cujo resultado seja número exato. Com base nestas características, a compensação da luminosidade pode ser obtida com o produto da razão da proporção da imagem ampliada com a imagem reduzida. Este fato não quer dizer que, quando estas condições não estão presentes na imagem, inviabiliza a restauração da luminosidade. A aproximação resultante pode não ser perceptível subjetivamente.

A redução de resolução dos blocos de uma imagem é dada da seguinte maneira: após o cálculo da DCT direta, uma região de baixas frequências de tamanho pré-definido é conservada, e o restante é totalmente zerado, eliminando as altas frequências. E após realizado este processo, aplicam-se o fator multiplicativo previamente citado e a transformada DCT inversa, levando o bloco da imagem novamente ao domínio espacial. Para aumentar a resolução dos blocos de uma imagem, faz-se o processo inverso: calcula-se a DCT direta, acrescentam-se altas frequências nulas, e aplicam-se o fator multiplicativo previamente citado e a transformada DCT inversa, levando o bloco da imagem novamente ao domínio espacial. Os processos de redução e de aumento de resolução de imagens são ilustrados na Figura 8.

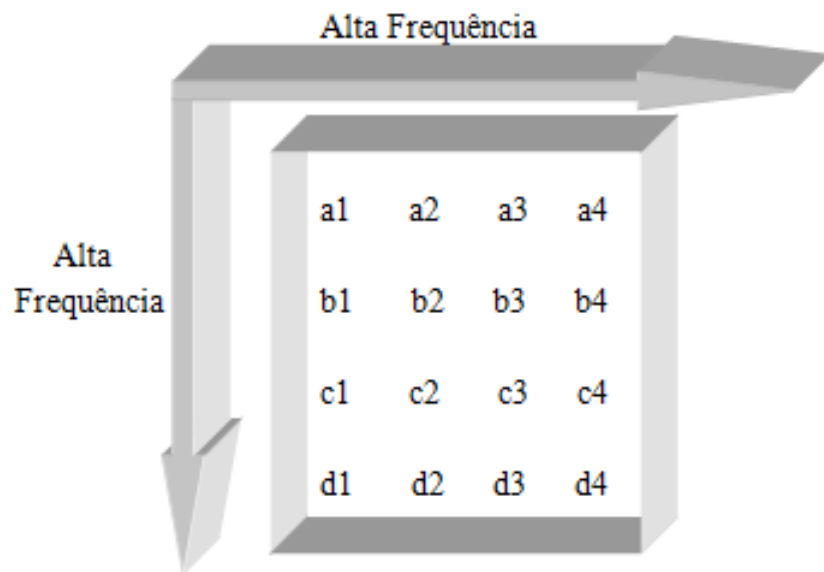


Figura 11 – Matriz de Coeficientes DCT

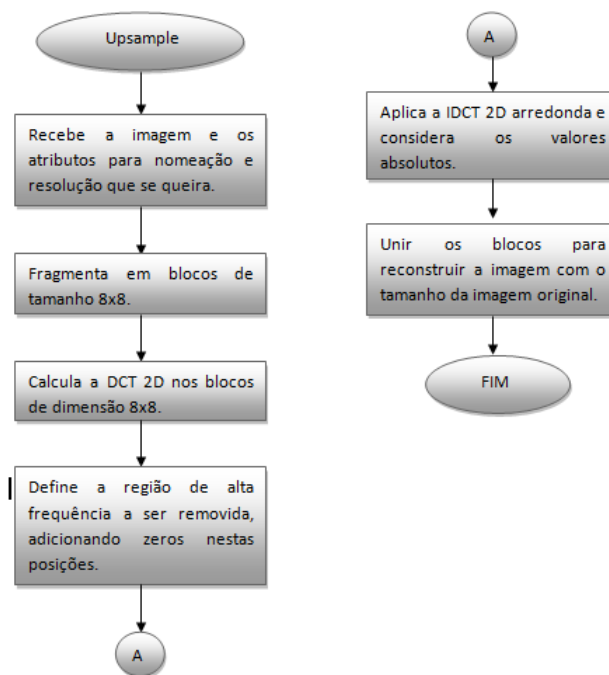


Figura 12 – Algoritmo proposto para UpSample

3.2 Método proposto para redução do tempo gasto

A forma como foram implementados os algoritmos para diminuição e aumento da resolução, ilustrados nas figuras 9 e 11, implicou em um elevado tempo de processamento. Devido a esse problema, tornou-se necessário reduzir a complexidade desses algoritmos desenvolvidos no matlab© para executar o processamento de maneira mais rápida. Os

tempos de execução dos algoritmos mencionados ficavam em torno de 2 segundos, o que inviabilizou a redução do consumo de energia nos receptores digitais.

Como o paradigma de programação do matlab® é trabalhar com operações de matrizes, foi proposto um novo método, que utiliza operações puramente matriciais para executar as lógicas necessárias para funcionamento do projeto com um menor tempo de processamento, pois operações matriciais no matlab® são realizadas de forma mais rápida. O método consiste em trabalhar com os blocos de tamanho 8×8 sem extraí-los da imagem. As operações de DCT nesses blocos são realizadas na própria imagem. Essa operação é chamada de produto tensorial de Kronecker, indicada na fig. X. Utilizando de uma matriz identidade juntamente com a função de coeficientes DCT_s , é possível criar uma matriz em blocos cuja diagonal é composta pelas matrizes de coeficientes DCT_s . Além disso, a função *sparse* permite o processamento mais rápido quando as matrizes tem grande quantidade de zeros.

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} & b \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} \\ c \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} & d \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

<http://www.chemie.uni-mburg.de/>

Figura 13 – Esta ferramenta proporcionou uma redução no tempo gasto de 2 segundos para 10 milissegundos.

3.3 Interpolações

Para comparar o desempenho do método da Seção 3.1 (SALAZAR; TRAN, 2005) com as interpolações clássicas *nearest-neighbour*, *bilinear* e *bicubica*, foram feitos diversos testes de compressão JPEG e H.264/AVC em diferentes resoluções. Foram analisadas 12 imagens (Anexo A) usadas pela comunidade científica, e foi testada a redução de resoluções com valores compreendidos entre $1/8$ e $7/8$. O desempenho foi medido com base na taxa necessária para transmitir a imagem, e com base na PSNR das imagens decodificadas e interpoladas ao tamanho original.

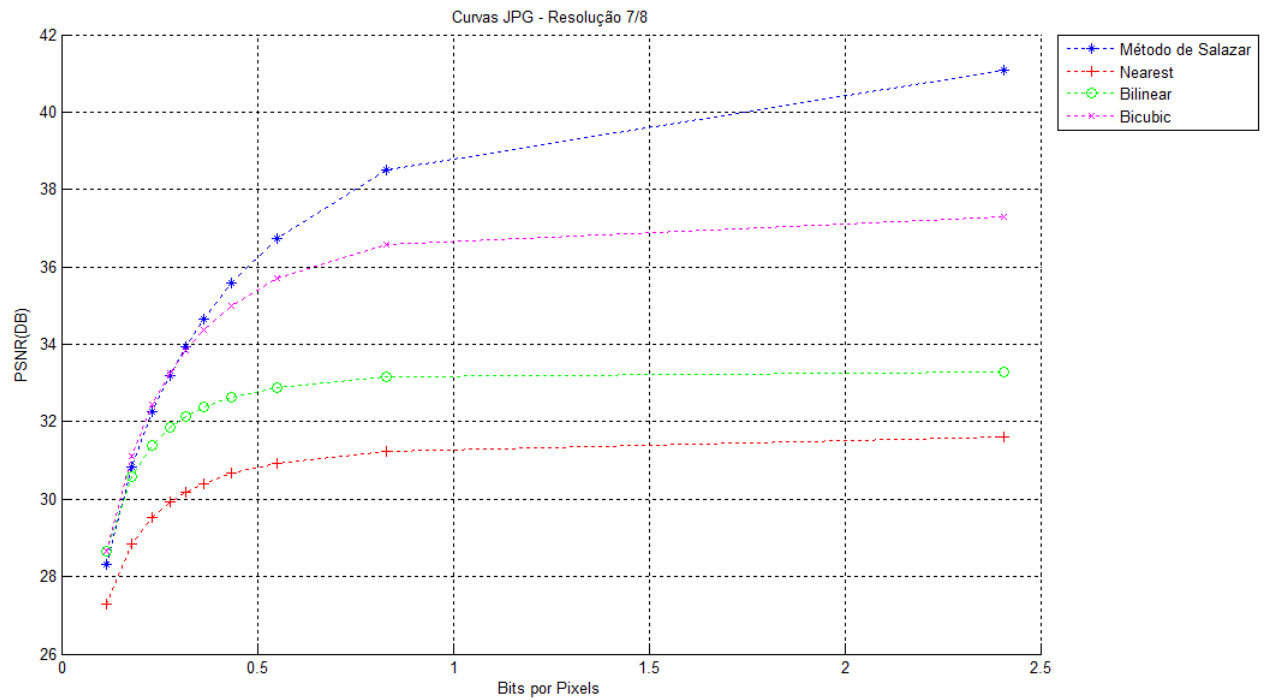


Figura 14 – Resposta das curvas de interpolações com o JPG resolução 7/8

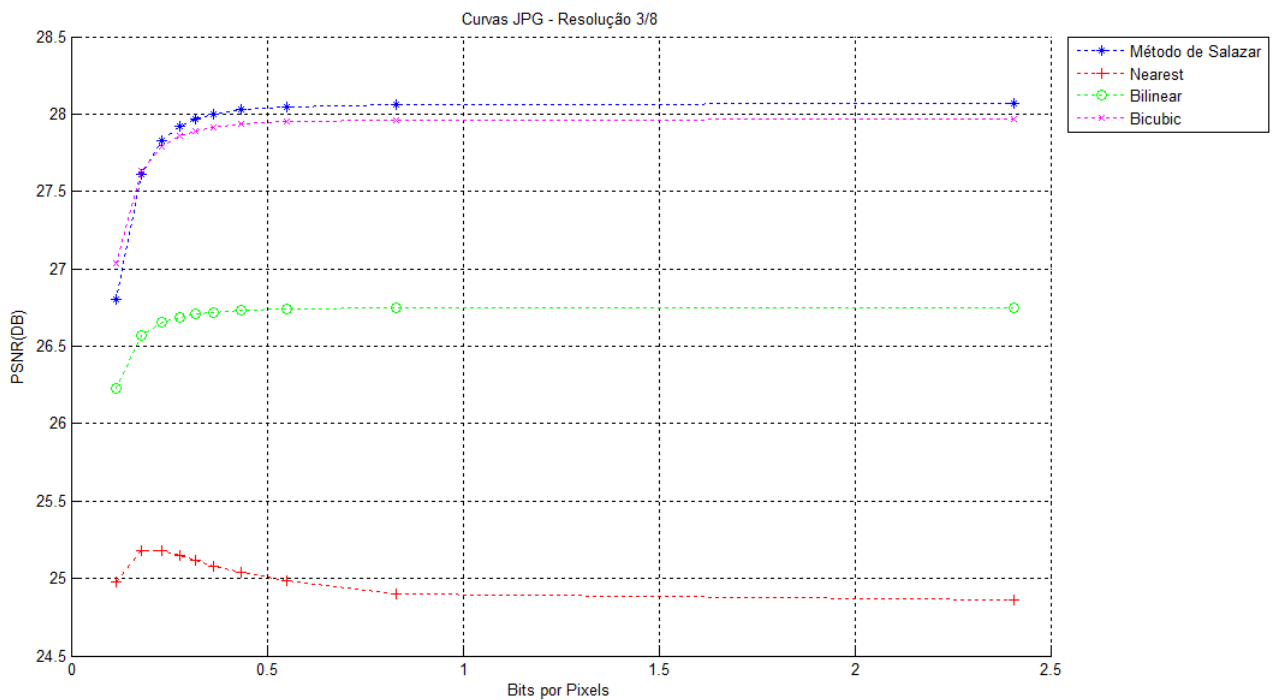


Figura 15 – Resposta das curvas de interpolações com o JPG resolução 3/8

Na Figura 14 e 15, estão presentes os resultados obtidos da comparação entre o método proposto por (SALAZAR; TRAN, 2005) e os algoritmos clássicos de interpolação. Estes gráficos foram obtidos a partir da variação da qualidade da imagem com o algoritmo

de compressão JPEG pronto no Matlab®. Verifica-se que, com esta imagem específica, quanto maior a qualidade objetiva da imagem, menor o desempenho dos algoritmos clássicos de interpolações.

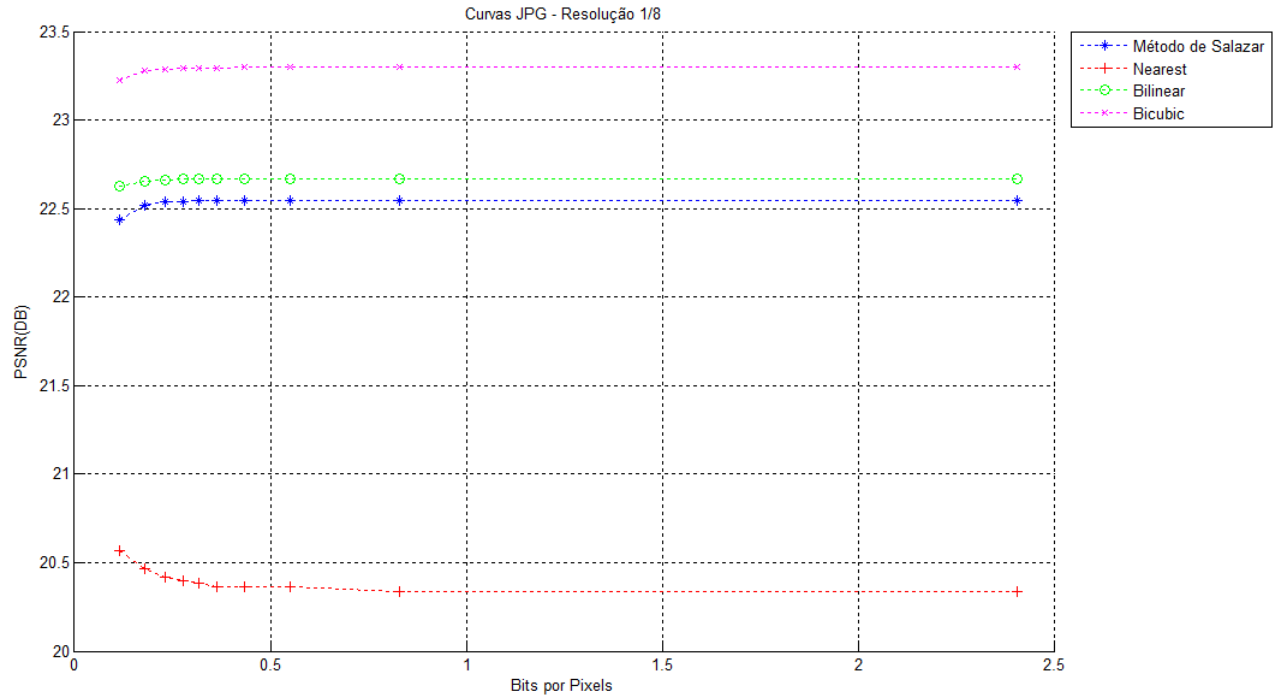


Figura 16 – Resposta das curvas de interpolações com o JPG resolução 1/8

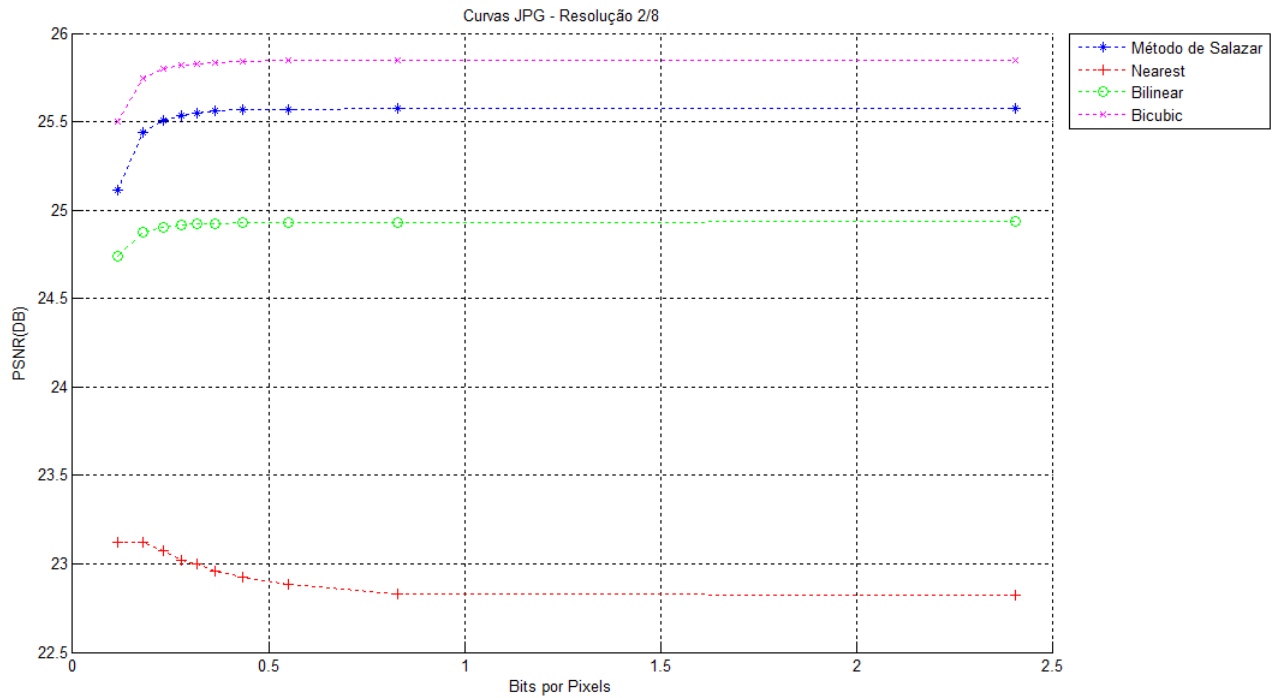


Figura 17 – Resposta das curvas de interpolações com o JPG resolução 2/8

Conforme os resultados expostos no Apêndice A, verifica-se que o método da Seção 3.1 é o mais adequado em termos de taxa e distorção. Nas imagens de resolução muito pequena (1/8 e 2/8), a interpolação bicúbica teve o melhor desempenho, vide fig.15 e 16, mas isto não invalida o método proposto por (SALAZAR; TRAN, 2005), já que estas são imagens com qualidades muito baixas, objetiva e subjetivamente. Nos outros gráficos constantes do Apêndice A, observa-se que o comportamento de todas as imagens, à medida que a resolução diminui, pior é o desempenho do método proposto por (SALAZAR; TRAN, 2005). Contudo, algumas resoluções podem ser consideradas desprezíveis. Estes resultados motivaram a escolha desse método para aplicação no trabalho proposto.

3.4 Desenvolvimento do algoritmo

Definida a forma de reduzir e aumentar a resolução das imagens, é possível definir uma lógica para verificar qual resolução utilizar de acordo com a imagem, de forma a atender o objetivo do projeto proposto. O propósito dessa escolha é aumentar a economia de energia nos receptores digitais em ondas curtas, com taxas e qualidades objetivas adequadas. O algoritmo proposto é apresentado na Figura 20, e é explicado a seguir:

- De posse do fator de mudança de resolução, a imagem original é reduzida por esse fator, e em seguida é codificada com o algoritmo de compressão usado inicialmente. Para medir o desempenho do método proposto, obtém-se a taxa T2 da imagem de resolução reduzida e codificada, a PSNR Q2 da imagem decodificada e aumentada para a sua resolução original, e o tempo S2 de decodificação e de aumento da resolução da imagem.

No próximo capítulo, são apresentados os testes feitos com o método proposto.

4 Discussão dos Resultados

4.1 Desempenho alcançado

Com o intuito de testar o algoritmo na seção anterior, foram utilizadas as 12 imagens citadas anteriormente, usando os dois métodos de compressão abordados neste trabalho, H.264/AVC e JPEG. Na etapa de recepção, foi medido o tempo do processo de decodificação da imagem juntamente com o aumento de resolução e comparado com o tempo de decodificação da imagem sem o aumento da resolução. Além do tempo, foi comparada a qualidade objetiva nos dois processos e a taxa de transmissão.

Os testes foram gerados nas seguintes condições: para a compressão JPEG, utilizou-se o codificador disponível no software MatLab©, e, para obter as curvas de taxa/tempo e taxa/distorção, variou-se a qualidade destas imagens de 10% a 100% em passos de 10. Para a compressão H.264/AVC, utilizou-se o software de referência JM 18.0 ([TOURAPIS KARSTEN SUHRING, 2009](#)), e, para obter as curvas de taxa/tempo e taxa/distorção, variou-se o parâmetro de quantização (QP) de 28 a 48 em passos de 2.

As curvas de tempo/taxa foram geradas em um notebook com sistema operacional Windows 8© com as seguintes configurações de hardware:

- Fabricante CCE;
- Modelo Win;
- Processador Intel (R) core (TM) i7-3517u, clock de 1.90Ghz até 2.40Ghz;
- Memória de 4 GB (Utilizável 3.84 GB).

Além destas características citadas, existe a questão dos outros softwares utilizados pelo sistema operacional, que influenciam diretamente na medida dos tempos de decodificação. Para contornar esta situação, decodificaram-se as imagens 20 vezes com a resolução selecionada, e escolheu-se o menor dos tempos, porque o objetivo era contornar os gastos de tempo por outros algoritmos em execução no computador. As informações de tempo foram tiradas utilizando uma ferramenta do MatLab© chamada Data Cursor, que permitiu obter valores com maior precisão.

As Figuras 19 e 20 apresentam os resultados de taxa/tempo e taxa/distorção para a imagem Crew (Anexo A) utilizando os codecs JPEG e H.264/AVC, respectivamente. Os demais resultados referentes às outras imagens do (Anexo A) encontram-se no (Apêndice B).

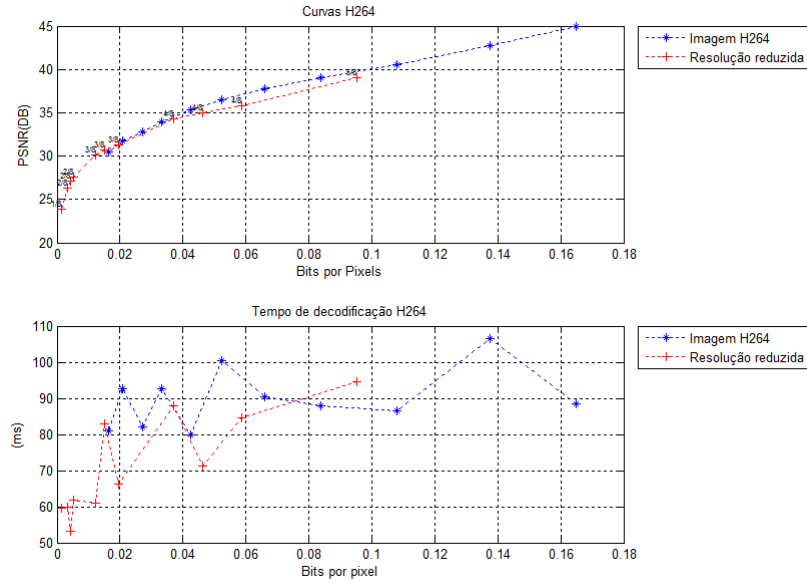


Figura 19 – Curvas obtidas do algoritmo desenvolvido no trabalho da Imagem Crew

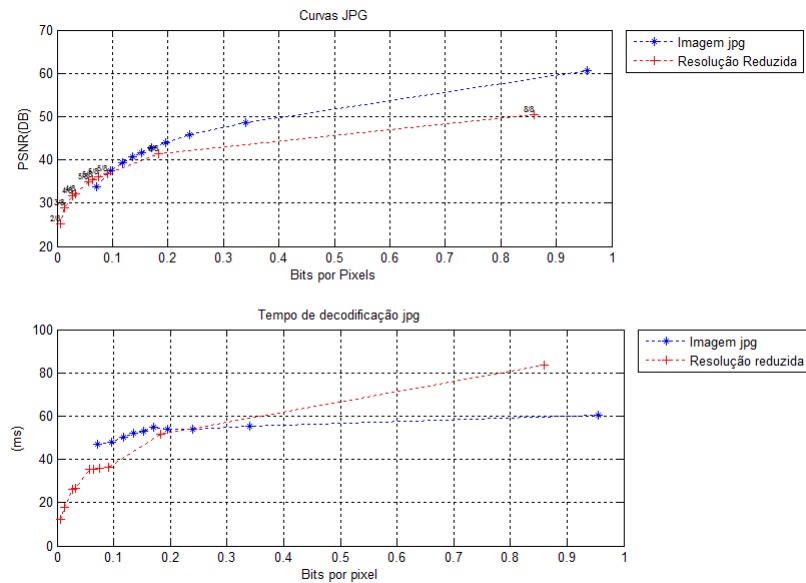


Figura 20 – Curvas obtidas do algoritmo desenvolvido no trabalho da Imagem Crew

Analisando a Figura 19, percebe-se que para a taxa de 0.04 bits/pixel a diferença do tempo entre a curva azul e a vermelha fica em torno de 20ms, e analisando a mesma taxa no gráfico pertinente a taxa de distorção, encontra-se o ponto de aproximadamente 36 dB. E nesta situação, a resolução da imagem pelo método proposto está próxima de 4/8 com uma qualidade de imagem bastante aceitável, e com uma economia de energia razoável. O mesmo procedimento pode ser repetido para as informações referentes as imagens comprimidas com o JPEG, onde a tabela 1 é composta dos resultados gráficos aqui ilustrados e contidos no (Apêndice B).

4.2 Transmissões realizadas em ondas curtas

Para a realização de testes experimentais foi utilizado uma plataforma¹ sistema composto de três estágios, “Servidor de Conteúdo”, “Sistema de Transmissão” e “Recepção”, foi implementado, conforme ilustra a Figura 21. dos arquivos HTML contendo as imagens de teste codificadas com o padrão JPEG, em resolução normal e em resolução reduzida.

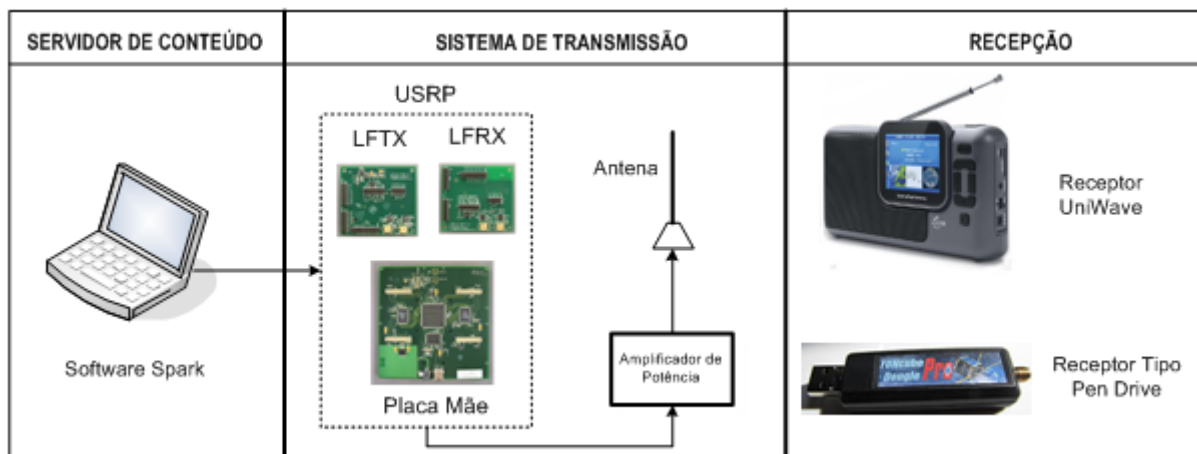


Figura 21 – Plataforma proposta de um sistema de transmissão e recepção em ondas curtas

4.2.1 Servidor de Conteúdo

O Software Spark, além de Servidor de Conteúdo é um modulador DRM (DRM+ e AM), que utiliza o conceito de Rádio Definido por Software – SDR (Software Defined Radio) para operar nas seguintes faixas de frequências: MF, HF e VHF. O SDR é um dispositivo de comunicação sem-fio que possui parte de suas funções implementadas por software em computador, em vez de usar componentes fixos de hardware (MITOLA, 1995). Assim, é possível, utilizando o software, inserir vários tipos de serviço agregados ao áudio da emissora, mas sempre considerando as limitações da capacidade de transmissão de um sistema de comunicação digital (COUCH, 2001). A Figura 22. ilustra as telas de abertura do Spark licenciado para os testes no Brasil e a configuração do Servidor de Conteúdo.

¹ Essa plataforma/protótipo foi implementada no trabalho “AVALIAR A VIABILIDADE DA RADIODIFUSÃO DIGITAL EM ONDAS CURTAS PARA EDUCAÇÃO A DISTÂNCIA”, que está em desenvolvimento na Universidade Nihon Gakko, ciudad del este/Paraguai. Cedida pela aluna Amanda Abreu Menezes.

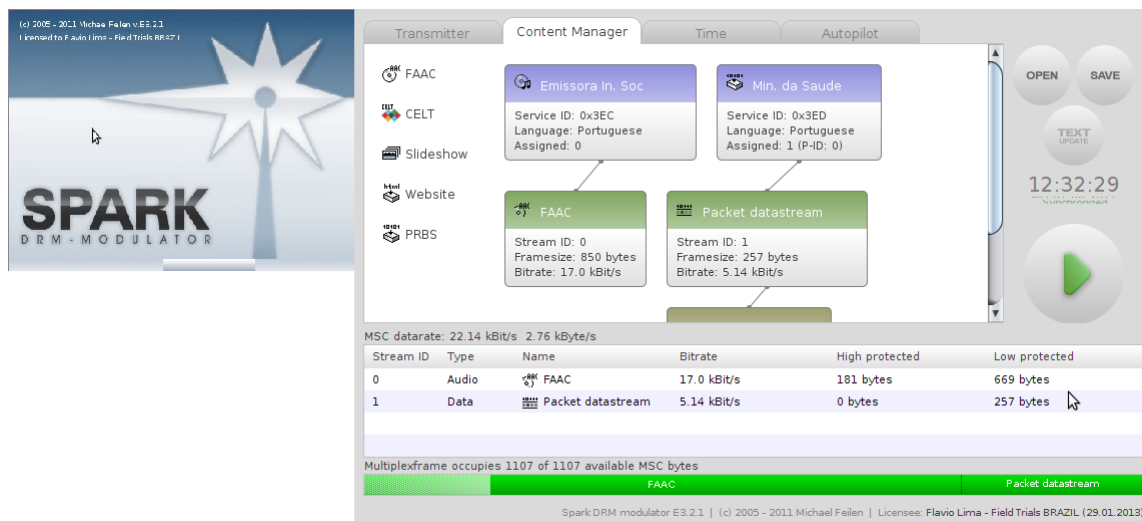


Figura 22 – Telas de abertura do software Spark e do Servidor de Conteúdo com configuração inicial.

4.2.2 Sistema de Transmissão

O Sistema de Transmissão tem como componente principal uma plataforma aberta de baixo custo, chamada de USRP (Universal Software Radio Peripheral) (ETTUS, 2009), responsável pela segunda parte do processamento exigido em um sistema SDR, ou seja, transformar o processamento feito pelo software em Rádio Frequência – RF. Portanto, a USRP é formada por dois componentes principais: a placa mãe com conexão USB para comunicação com o computador, responsável pelas funções programáveis mais complexas, implementadas em uma Altera Cyclone FPGA (Field Programmable Gate Array), e duas placas filhas ou daughterboards, LFTX e LFRX, que contêm o módulo de radiofrequência, responsável pela sintonia da frequência central utilizada pelo dispositivo na transmissão e/ou recepção (BALISTER, 2006).

Devido às restrições impostas em cada país para a radiação de sinais não licenciados, sendo que no Brasil o limite é de 100 mW (ANATEL, 2013), a placa filha LFTX disponibiliza em sua saída uma potência de apenas 2 mW, ou seja, de aproximadamente 3dBm. Assim, de maneira a obter-se um nível de sinal de acordo com a sensibilidade do receptor a uma determinada distância do transmissor, foi colocado na saída da USRP um amplificador de potência, o Ultra Linear PostAmp, de 30 dB de ganho (de -10 dBm a +20 dBm) operando na faixa de frequência de 1 a 150 MHz e com potência máxima de saída de 100 mW (PostAmp, 2013). Para irradiar o sinal, uma antena modelo CB-20 com ganho de 2,15 dB e VSW $\leq 1,5$, operando em 27 MHz, foi acoplada ao amplificador de potência.

O cenário permitiu a transmissão de dados na faixa de ondas curtas. Para esta transmissão, foram preparados arquivos HTML contendo as imagens de teste codificadas com o padrão JPEG, em resolução normal e em resolução reduzida. A Figura 23 mostra

a estação de rádio digital virtual Spark Modulator (FEILEN M.SC., 2005), com diversos blocos de configuração. O bloco FAAC representa o compressor de áudio digital gratuito para a realização de testes. Neste bloco é configurado o arquivo de áudio a ser transmitido. No bloco *Packet datastream* define-se qual a taxa ideal de transmissão para as imagens, e no bloco Mot Website é escolhido o arquivo HTML que será enviado via radiofrequência. O sistema foi configurado para uma banda de transmissão de 10 kHz, onde 17 Kbit/s são reservados para o arquivo de áudio, e 5 Kbit/s para a imagem que será transportada junto com o arquivo HTML. Finalmente, a taxa de transmissão é indicada na barra de progressão verde, junto com informações de cabeçalho.

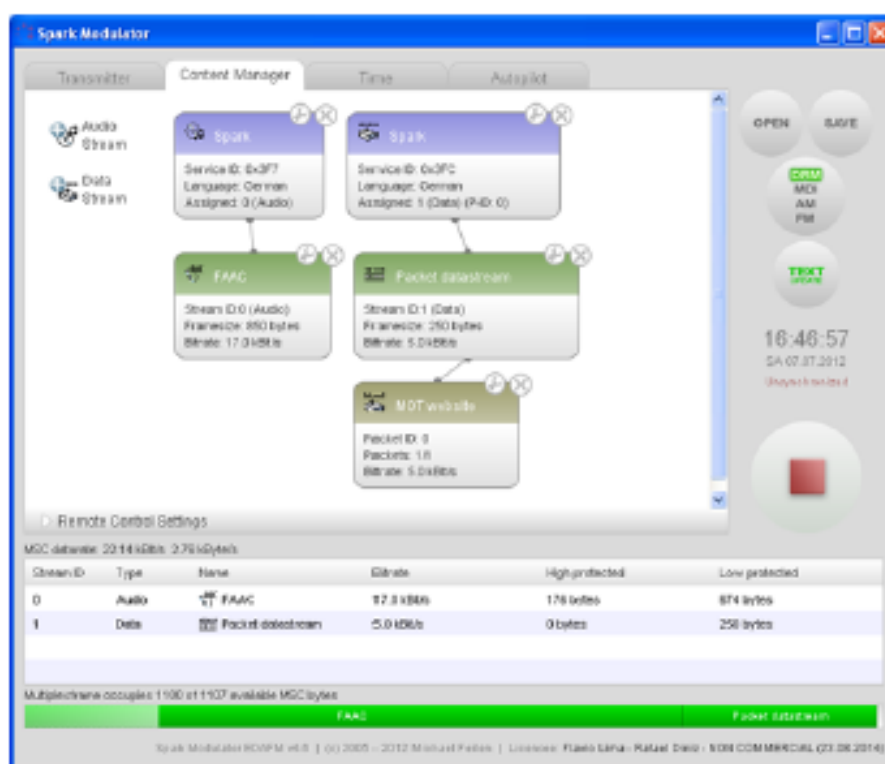


Figura 23 – Configuração Inicial da Rádio

A Figura 24 mostra parâmetros de transmissão que podem ser ajustados pelo operador. Estes não serão detalhados aqui porque não fazem parte do escopo do trabalho, porém é nesta tela que se habilita a transmissão do rádio digital em ondas curtas.

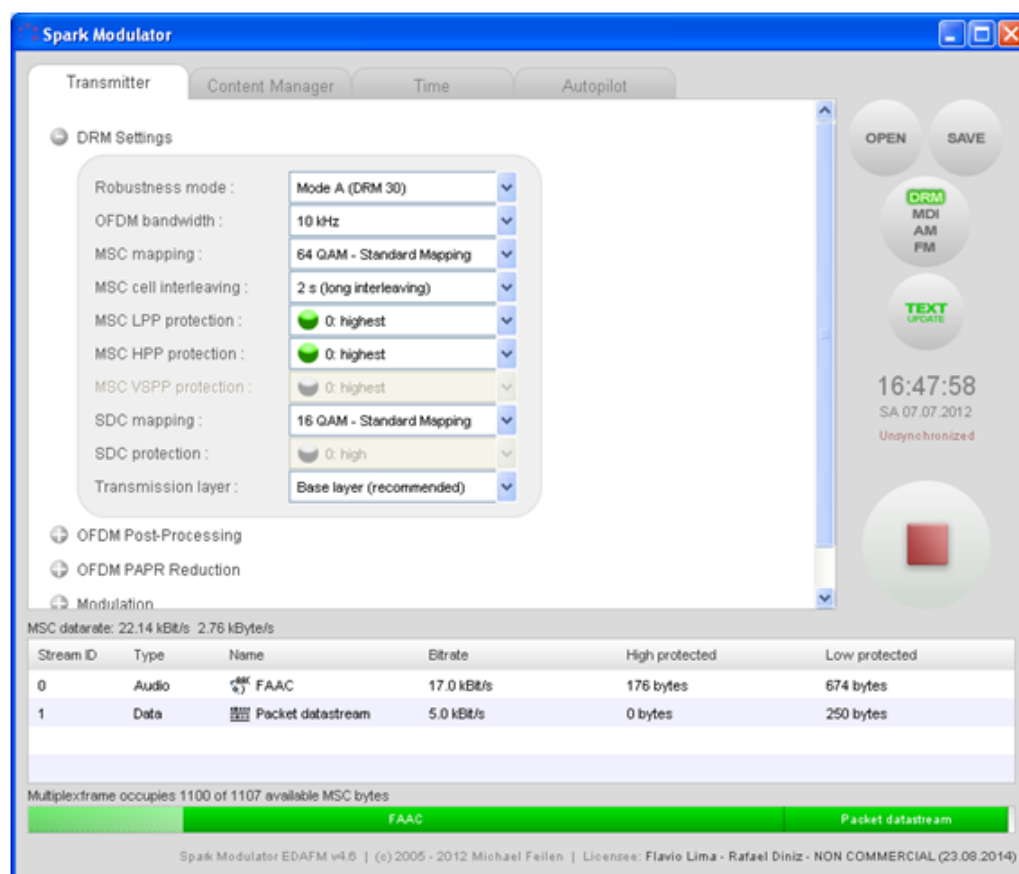


Figura 24 – Tela inicial do receptor digital

A Figura 25 mostra as informações do sinal sendo transmitido, tais como o espectro em frequência. Esta tela é usada para confirmar a banda de frequência e a taxa de transmissão em que a imagem está sendo transmitida. Na transmissão em formato carrossel, a imagem é transmitida após a conclusão da última transmissão.

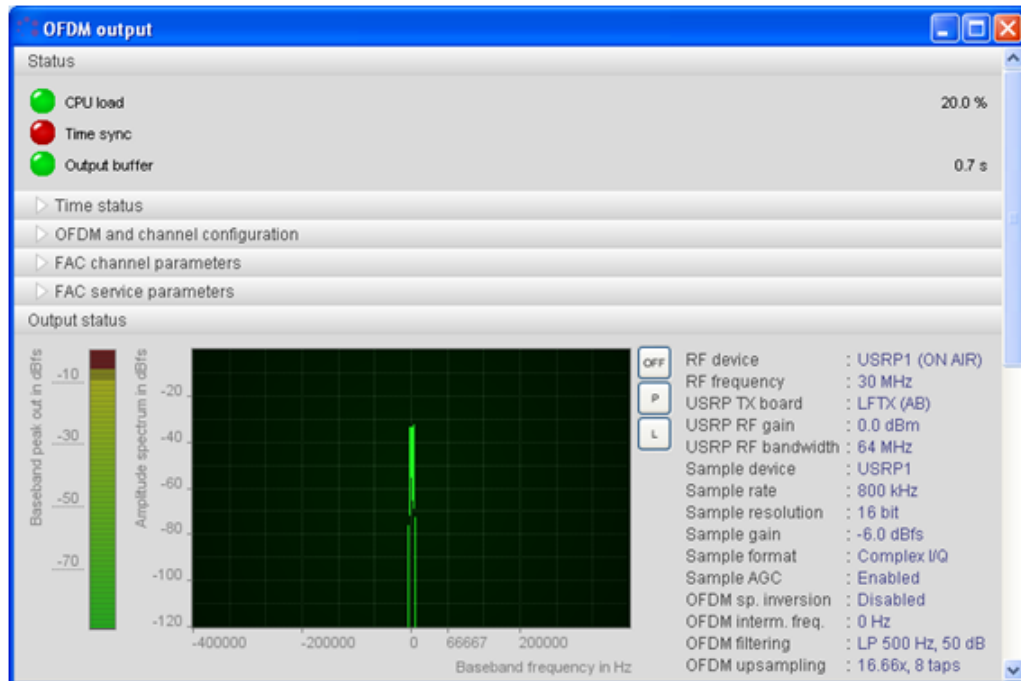


Figura 25 – Informações do sinal que está sendo recebido

4.2.3 Sistemas de Recepção

Para recepção do sinal irradiado, foi utilizado um receptor comercial UniWave, modelo Di-Wave 100, que opera nas faixas de ondas médias, tropicais e curtas nos modos analógico e digital, e na faixa de FM apenas no modo analógico, ilustrado na Figura 26. O UniWave, além de prover o áudio como qualquer receptor convencional, foi desenvolvido para operar com o sistema DRM, sendo portanto um receptor multimídia, ou seja, capaz de decodificar textos, imagens estáticas e em movimento, vídeos e páginas da internet (arquivos em HTML). O receptor Di-Wave 100 permite a recepção de inúmeras imagens e conteúdos de dados no modo carrossel, ou seja, as imagens ficam à disposição do usuário durante todo o tempo que o aparelho permanecer ligado, podendo ser salvas na memória interna do receptor ou em cartões de memória externos ao aparelho.



Figura 26 – Receptor UniWave

Concomitantemente, foi implementado um receptor alternativo via computador utilizando um receptor de sinal RF FUN cube Dongle Pro+ Serial 13660 e o software Dream, que é gratuito, conforme ilustra a Figura 27 (DRM, 2009).



Figura 27 – Receptor alternativo implementado via computador

Para a recepção do sinal através do receptor alternativo, foi instalado em um notebook um software aberto e gratuito chamado Dream <<http://sourceforge.net/projects/drm/files/dream>>. A tela inicial do Dream é ilustrada na Figura 28. Esse software permite a decodificação do sinal DRM30, apresentando os dados multimídias e o áudio, por exemplo, A Figura 28 ilustra as informações do arquivo HTML, além da imagem e do nível de sinal recebido, permitindo visualizar o site em HTML e ouvir o áudio decodificado.

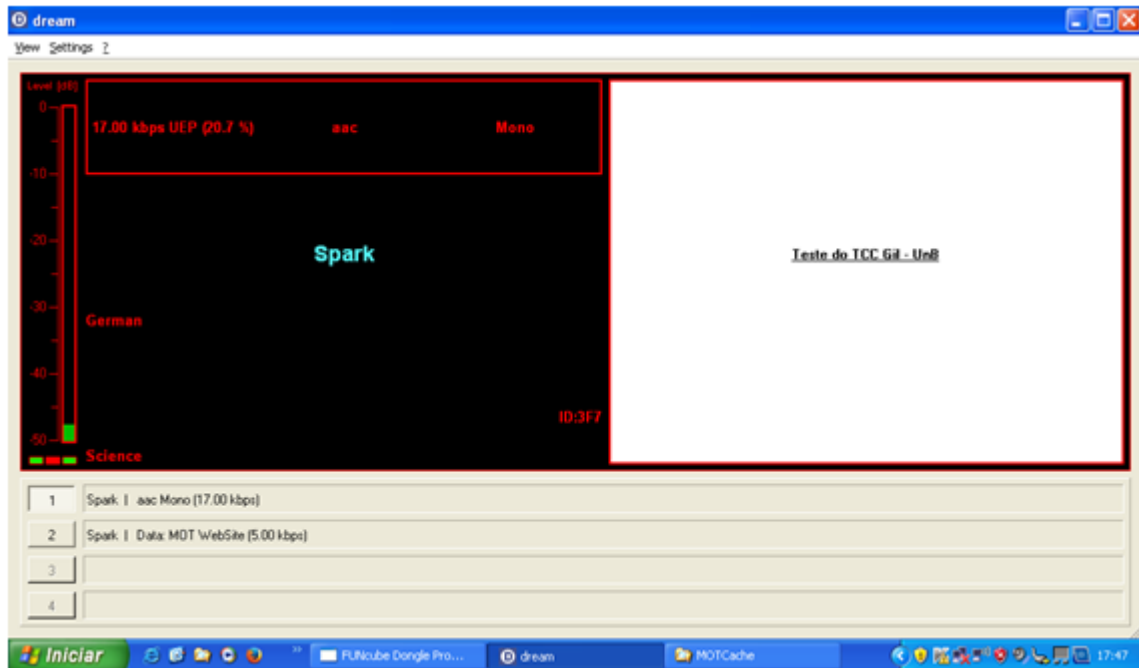


Figura 28 – Receptor alternativo implementado via computador

Ao mesmo tempo, o Dream funciona como analisador de sinal DRM, permitindo avaliar todos os parâmetros transmitidos do sistema, bem como as características dos sinais de propagação em banda básica e em RF. Por exemplo, na Figura 29, é possível visualizar as informações do sinal modulado que está sendo transmitido, e caso ocorra algum problema na recepção, é possível diagnosticar as causas.

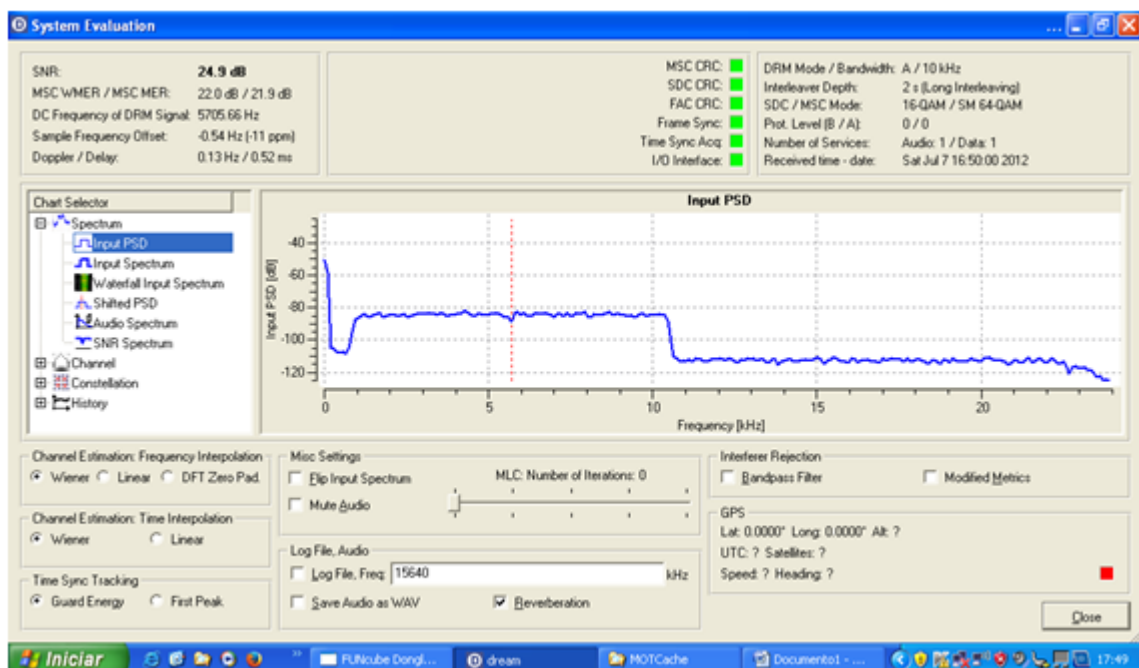


Figura 29 – Receptor alternativo implementado via computador

4.3 Aplicação do programa desenvolvido

A Tabela 1 apresenta informações de taxa, distorção e tempo de decodificação dos pontos em que se obteve o melhor resultado da diferença do tempo de decodificação com os métodos original e proposto, como apresentado na Seção 4.1. Com base na Tabela 1, a Tabela 2 apresenta o ganho no tempo de transmissão que a técnica proposta proporcionou. Como se pode ver, o algoritmo proposto oferece redução considerável de tempo de transmissão e de decodificação das imagens, chegando a 50% do tempo de transmissão na imagem City. Os dados da Tabela 1 foram retirados dos gráficos do Apêndice A, tendo por referência o valor de 30 dB de PSNR no gráfico referente à taxa x distorção. É constatado objetivamente que a diferença é pouco perceptível em relação à imagem original codificada. A qualidade entre a imagem degradada e a imagem de referência pode ser vista Apêndice C. A partir do limite estabelecido de 30dB, com a mesma taxa é retirado a diferença do tempo conforme descrito na tabela 1. Sendo assim, foi possível avaliar o tempo ganho em relação à imagem original decodificada pelo método proposto e a imagem original decodificada pelas técnicas de compressão H.264/AVC e JPEG.

Tabela 1 – Resultados de cada imagem

Parâmetros Obtidos dos Gráficos						
Nome da Imagem	Codec	Resolução	Taxa	PSNR	t (ms)	PQ/QJPEG
Mobcal	H264/AVC	5/8	0.20	28	6	34
	JPEG	6/8	0.30	29	4.58	80
Parkrun	H264/AVC	5/8	0.26	24	13.4	36
	JPEG	5/8	0.20	24	2.18	60
Shields	H264/AVC	4/8	0.14	28	10.74	34
	JPEG	5/8	0.26	30	7	80
Stockholm	H264/AVC	4/8	0.20	32	14.3	30
	JPEG	5/8	0.14	24	11.44	80
Airplane	H264/AVC	5/8	0.25	33	2.85	30
	JPEG	5/8	0.3	34	3.2	80
Barbara	H264/AVC	5/8	0.14	26	16.62	38
	JPEG	6/8	0.20	28	1.54	60
City	H264/AVC	4/8	0.18	30	7.51	34
	JPEG	5/8	0.20	31	2.46	70
Crew	H264/AVC	6/8	0.09	31	2.74	28
	JPEG	6/8	0.20	41	1	80
Goldhill	H264/AVC	5/8	0.20	31	2.72	30
	JPEG	5/8	0.20	31	5	80
Lena	H264/AVC	4/8	0.20	34	1.26	30
	JPEG	5/8	0.20	34	7.23	90
Mandrill	H264/AVC	5/8	0.20	23	2.44	38
	JPEG	6/8	0.30	25	1.67	60
Peppers	H264/AVC	4/8	0.20	32	5.87	32
	JPEG	6/8	0.33	33	2.1	90

As informações pertinentes às imagens analisadas constantes na Tabela 2 foram geradas com base nos parâmetros da Tabela 1. O objetivo destas informações é verificar o ganho que a técnica proporcionou no tempo de transmissão. De acordo com a Seção 3.4, o algoritmo responsável pela diminuição da resolução ficará na etapa de transmissão. Nesta situação, imagens JPEG reduzidas e no caso do H.264/AVC o stream conforme os parâmetros da Tabela 1, onde foi definido em que ponto tem-se a melhor contribuição em relação ao gasto de energia. Outra questão importante é o tempo de transmissão gasto apresentado na Tabela 2. Na parte do receptor fica o algoritmo para realizar o aumento da resolução onde as imagens estão anexas ao Apêndice C para validação subjetiva.

Tabela 2 – Resultados da transmissão das imagens com compressão JPEG

Taxa de transmissão (5Kbps)			
Nome da Imagem	Tipo	Tamanho(KB)	Tempo de transmissão(s)
Mobcal	Reduzida	139	222.4
	Ampliada	186	297.6
Parkrum	Reduzida	78.7	125.92
	Ampliada	189	302.4
Shields	Reduzida	90.6	144.96
	Ampliada	152	243.2
Stockholm	Reduzida	69.1	110.56
	Ampliada	118	188.8
Airplane	Reduzida	20.7	33.12
	Ampliada	34.2	54.72
Barbara	Reduzida	36.3	58.08
	Ampliada	68.9	110.24
City	Reduzida	28.3	45.28
	Ampliada	60	96
Crew	Reduzida	24.4	39.04
	Ampliada	31.8	50.88
Goldhill	Reduzida	33.8	54.08
	Ampliada	57.6	92.16
Lena	Reduzida	29.5	47.2
	Ampliada	34.4	55.04
Mandrill	Reduzida	32.9	52.64
	Ampliada	63.1	100.96
Peppers	Reduzida	28.8	46.08
	Ampliada	38.7	61.92

Os resultados constantes da Tabela 2 mostraram que os cálculos realizados na Seção 4.1 foram aproximações meramente ilustrativas para exemplificar o ganho relativo de economia de energia. Como foi visto nesta seção, é possível alcançar economia de energia maior porque nem o tempo gasto para transmissão das imagens grandes chegou a 1 minuto, tendo em vista que, nos cálculos realizados na Seção 4.1 utilizou-se o menor tempo que causaria a menor economia de energia que poderia ser alcançada por uma das imagens utilizadas no teste.

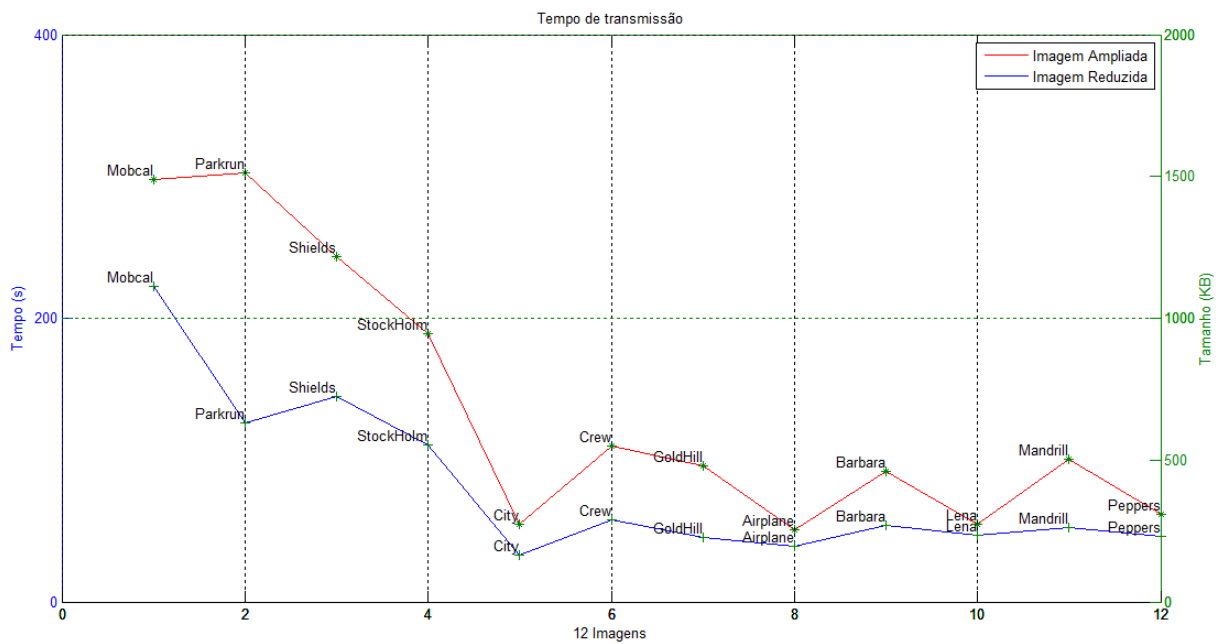


Figura 30 – Desempenho das imagens

O gráfico da Figura 30, descreve o comportamento das imagens em relação ao tempo de transmissão e ao tamanho. As curvas mostram que cada imagem assume características diferentes conforme a variação da matiz de cores e do nível de escala de cinza. Portanto, apesar destas variações, a contribuição no tempo de transmissão é evidente, conforme se observa no gráfico.

5 Conclusão e Trabalhos Futuros

O intuito deste trabalho foi trabalhar as imagens antes de utilizar codificadores de imagens existentes no mercado, de forma a diminuir o tempo de processamento dessas imagens no receptor portátil de rádio digital. Conforme, demonstrado acima, o projeto atendeu às expectativas.

O algoritmo proposto escolhe a resolução mais adequada para atender os objetivos propostos neste trabalho, que é o ganho no tempo de decodificação comparado com a imagem original. Este processo contribui para a economia de energia. Além disto, propicia uma imagem com uma taxa reduzida em relação à imagem original, o que permite menor ocupação espectral.

O programa deve ser instalado no hardware referente aos transmissores, realizando a redução de resolução da imagem antes da codificação. De maneira dual, os receptor recebe os dados codificados, faz a decodificação, e em seguida realizará o aumento de resolução da imagem, por meio do programa proposto.

A aplicação pode ser realizada nos serviços de radiodifusão digital em geral, tais como rádio, televisão e telefonia celular, que conta com os recursos de SMS e páginas HTML. Como no rádio digital em ondas curtas existem bandas de até 4,5 kHz, este algoritmo atenderia bem esta demanda, embora no Brasil esteja prevista uma banda de 10 kHz.

Conforme os resultados expostos, constatou-se também que o método de mudança de resolução pela DCT obteve melhor desempenho em relação aos métodos clássicos de interpolação: *nearest-neighbour*, *bilinear* e *bicúbica*. Isto possibilitou melhorar bastante a qualidade objetiva das imagens analisadas (Anexo A). A qualidade das imagens após o processamento proposto pode ser analisada subjetivamente no (Apêndice C).

Algumas evoluções no algoritmo desenvolvido podem ser propostas, tais como mudanças adaptativas para encontrar em que taxa haverá a maior economia de energia, e a qualidade adequada para as imagens. Além disso, os pontos de maior economia mostrados na Seção 4.3 foram escolhidos manualmente, com base nos gráficos do Apêndice B. Futuramente, pode-se desenvolver um algoritmo que decida se é melhor mandar a imagem com a técnica proposta ou mandar a imagem original. Além disso, as características almejadas no trabalho só se configuram em algumas taxas de compressão.

Para reduzir ainda mais o tempo gasto pelos decodificadores, pode ser trabalhada a implementação do algoritmo em linguagem C, embora o Matlab© permita trabalhar de forma rápida com matrizes. As rotinas cíclicas em linguagem C teoricamente devem

gastar menos tempo que a rotina em linguagem Matlab©, já que o forte dessa linguagem é trabalhar com manipulação de matrizes.

A transmissão em ondas curtas pode atingir áreas que outros tipos de sinais de radiofrequência não alcançam, devido à distância e à densidade de florestas. Nestas circunstâncias, o projeto desenvolvido pode contribuir para atender pessoas residentes nessas áreas, de forma a disponibilizar novos serviços a essa população. Em um contexto de transmissão de imagens de cunho educativo, a economia de energia e a redução no tempo de transmissão contribuiriam bastante.

Outro fator importante a ser mencionado é que a economia de energia neste trabalho não foi quantificada porque seria necessário estudar métodos para possibilitar medir o percentual de energia que foi ganho com esta implementação. Contudo, é possível afirmar que houve economia de energia devido aos resultados expostos no trabalho.

Referências

- ANATEL. Resolução nº 506, de 1º de julho de 2008. julho 2013. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br>>. Citado na página 49.
- BALISTER, P. R. J. Usrc hardware and software description. June 2006. Citado na página 49.
- BT.601-7, I.-R. *Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and widescreen 16:9 aspect ratios*: Itu-recommendation bt.601-7. [S.l.], 2007. Citado na página 26.
- COUCH, L. W. Digital e analog communication system. January 2001. Citado na página 48.
- DRM. *Acessado em 05 de novembro de 2014*. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.drm.org>>. Citado na página 22.
- DRM. Dm receiver. February 2009. Disponível em: <<http://sourceforge.net/projects/drm/>>. Citado na página 53.
- ETTUS, M. Universal software radio peripheral. fevereiro 2009. Disponível em: <<http://www.ettus.com>>. Citado na página 49.
- FEILEN M.SC., F. S. D. I. A. S. M. *Spark Modulator 4.1 (11/06/2012)*. [S.l.], 2005. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 50.
- FILHO OGê VIEIRA NETO, H. M. *Processamento Digital de Imagens*. Quarta edição. [S.l.]: Brasport, 1999. Citado na página 28.
- GONZALEZ, W. E. R. R. C. *Digital Image Processing*. Second edition. [S.l.]: Prentice Hall, 2008. Citado 6 vezes nas páginas 22, 23, 25, 26, 27 e 38.
- HUNG, E. M. Compensação de movimento utilizando blocos multi-escala e forma variável em um codec de vídeo híbrido. Julho 2007. Disponível em: <http://image.unb.br/queiroz/papers/tese_mintsu_msc.pdf>. Citado na página 31.
- J.247, I.-T. R. *Objective perceptual multimedia video quality measurement in the presence of a full reference*. [S.l.], 2008. Citado na página 32.
- KHALID, S. *Introduction to Data Compression*. Third edition. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2006. Citado na página 29.
- MACHADO, A. *Pré-cinemas e Pós-cinemas*. Quarta edição. [S.l.]: Papirusl, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- MITOLA, j. The software radio architecture.communications. v. 33, May 1995. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org>>. Citado na página 48.

- MOTTA, R. da S. Desenvolvimento de uma plataforma para estudos da inclusão social em Áreas remotas por meio da radiodifusão digital na faixa de ondas curtas. 2013. Disponível em: <<http://conic-semesp.org.br/anais/files/2013/trabalho-1000015736.pdf>>. Citado na página 21.
- NEVES, J. S. Padrões de transmissão de rádio digital. Departamento de Engenharia de Telecomunicações - Universidade Federal Fluminense UFF, 2006. Disponível em: <<http://www.midiacom.uff.br/>>. Citado na página 22.
- PENNEBAKER, W. B.; MITCHELL, J. L. *Still Image Data Compression Standard*. [S.l.]: Van Nostrand Reinhold, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 30.
- RICHARDSON, I. *The H.264 Advanced Video Compression Standard*. Second edition. [S.l.]: John Wiley Sons Ltd, 2003. Citado 6 vezes nas páginas 10, 23, 27, 30, 31 e 36.
- SALAZAR, C. L.; TRAN, T. D. On resizing images in the dct domain. The Johns Hopkins University, ECE Department Baltimore,, MD 21218, 2005. Disponível em: <cls/trac@jhu.edu>. Citado 8 vezes nas páginas 10, 34, 35, 40, 41, 43, 44 e 63.
- SANTOS, H. Análise e desenvolvimento de conteúdo multimídia para radiodifusão digital. Abril 2014. Citado na página 20.
- SHANNON, C. *A Mathematical Theory of Communication*. The Bell System Technical Journal, 1948. Disponível em: <<http://cm.bell-labs.com/>>. Citado na página 29.
- SILVA, P. B. *Portaria nº 290, de 30 de março de 2010, publicada no diário oficial da união de 31/03/2010*. [S.l.], 2010. Citado na página 20.
- SILVA, P. B. *Portaria nº 113, de 14 de junho de 2011, publicada no diário oficial da união de 14/06/2011*. [S.l.], 2011. Citado na página 22.
- SULLIVAN PANKAJ TOPIWALA, A. L. G. J. The h.264/avc advanced video coding standard: Overveiw and introduction to the fidelity range extensions. August 2004. Disponível em: <<http://www.fastvdo.com/spie04/spie04-h264OverviewPaper.pdf>>. Citado na página 30.
- T81, I.-R. *Information Technology - Digital Compression and Coding of Continuous-Tone Still Images-Requirements and Guidelines: Itu-recommendation t81*. [S.l.], 1992. Citado na página 29.
- TOURAPIS KARSTEN SUHRING, G. S. A. M. *H.264/14496-10 AVC Reference Software Manal (revised for JM 18.0)*. [S.l.], 2009. Disponível em: <<http://iphone.hhi.de/suehring/tml/>>. Citado na página 46.

Apêndices

APÊNDICE A – Interpolações

Os resultados são constantes da comparação entre as interpolações *nearest* - *neighbour*, *bilinear*, *bicúbica* e o método proposto por (SALAZAR; TRAN, 2005). As curvas indicam o desempenho de cada técnica de interpolação já existente com o método desenvolvido por (SALAZAR; TRAN, 2005) onde a ferramenta utilizada é a Transformada Discreta do Cosseno (DCT). Elas foram levantadas variando a quantização nos algoritmos de compressão JPEG e H.264/AVC que reflete diretamente na qualidade da imagem observada, onde para cada taxa de distorção existe o nível de PSNR equivalente.

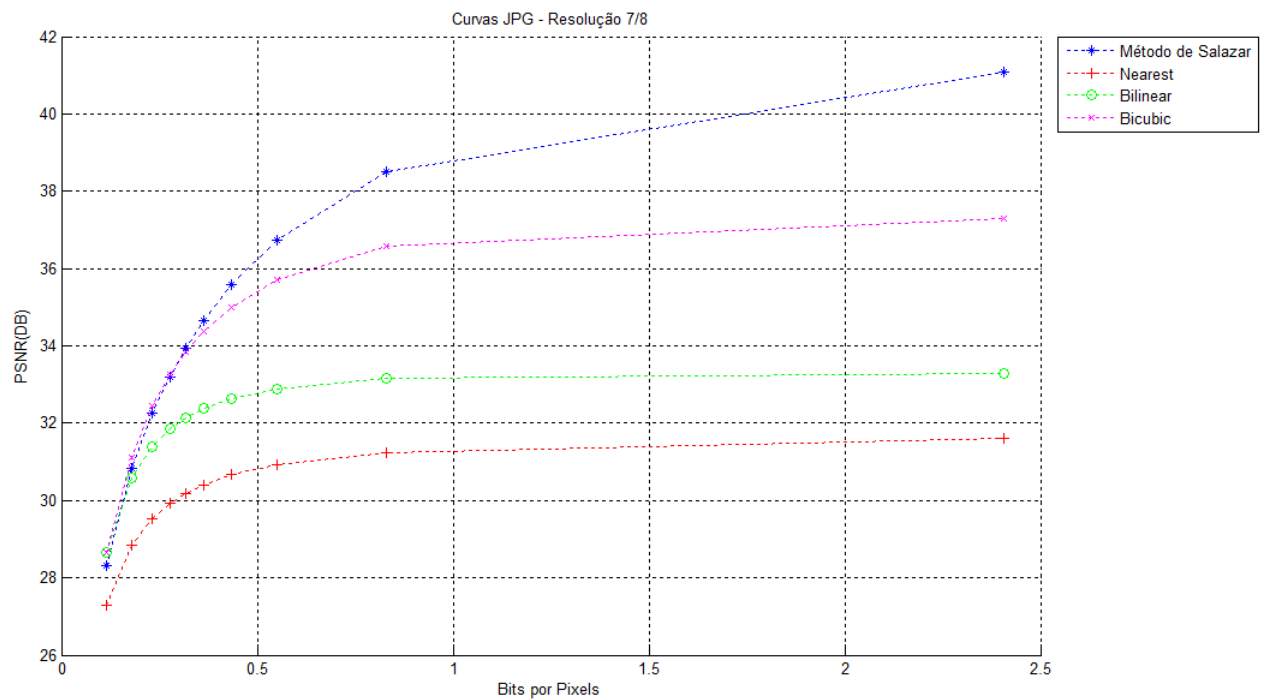


Figura 31 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 7/8

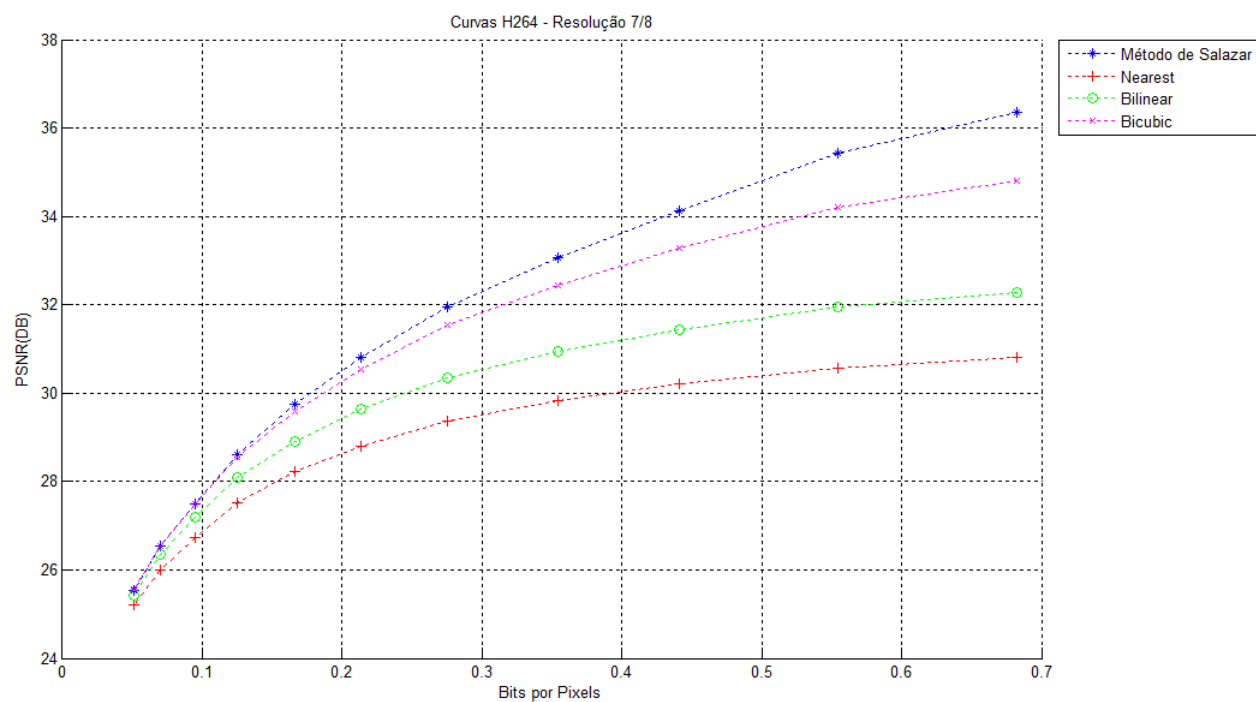


Figura 32 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 7/8

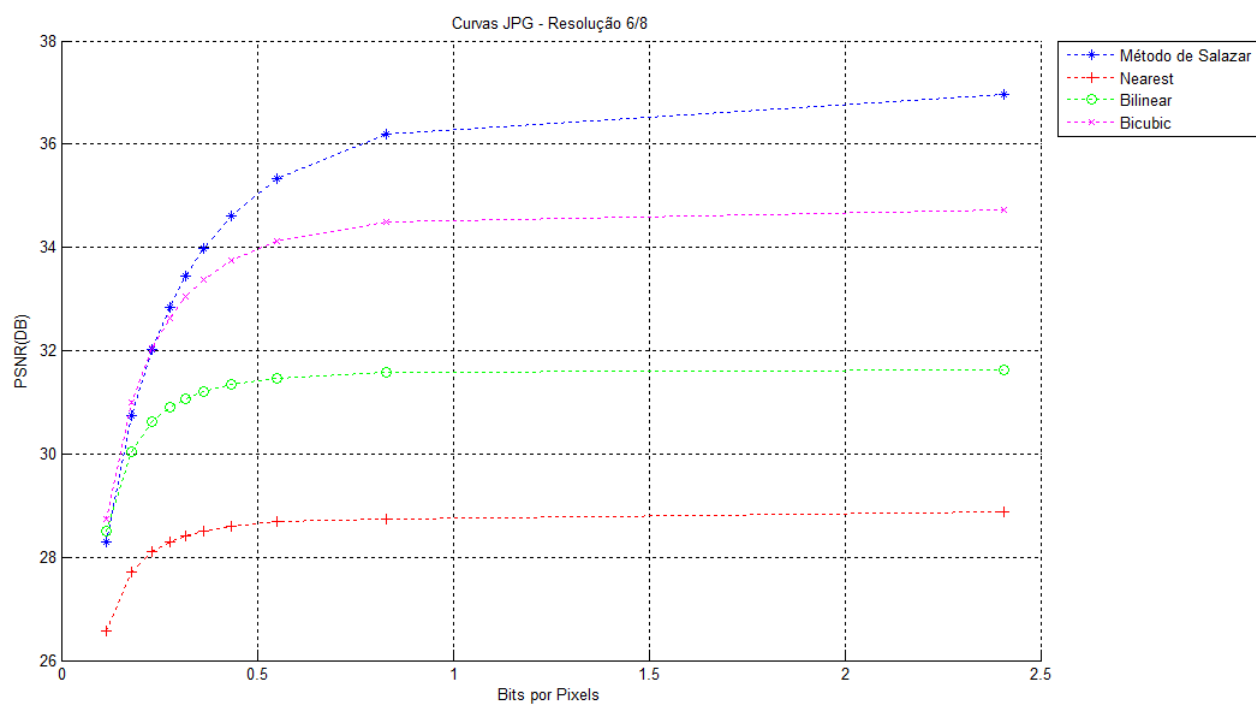


Figura 33 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 6/8

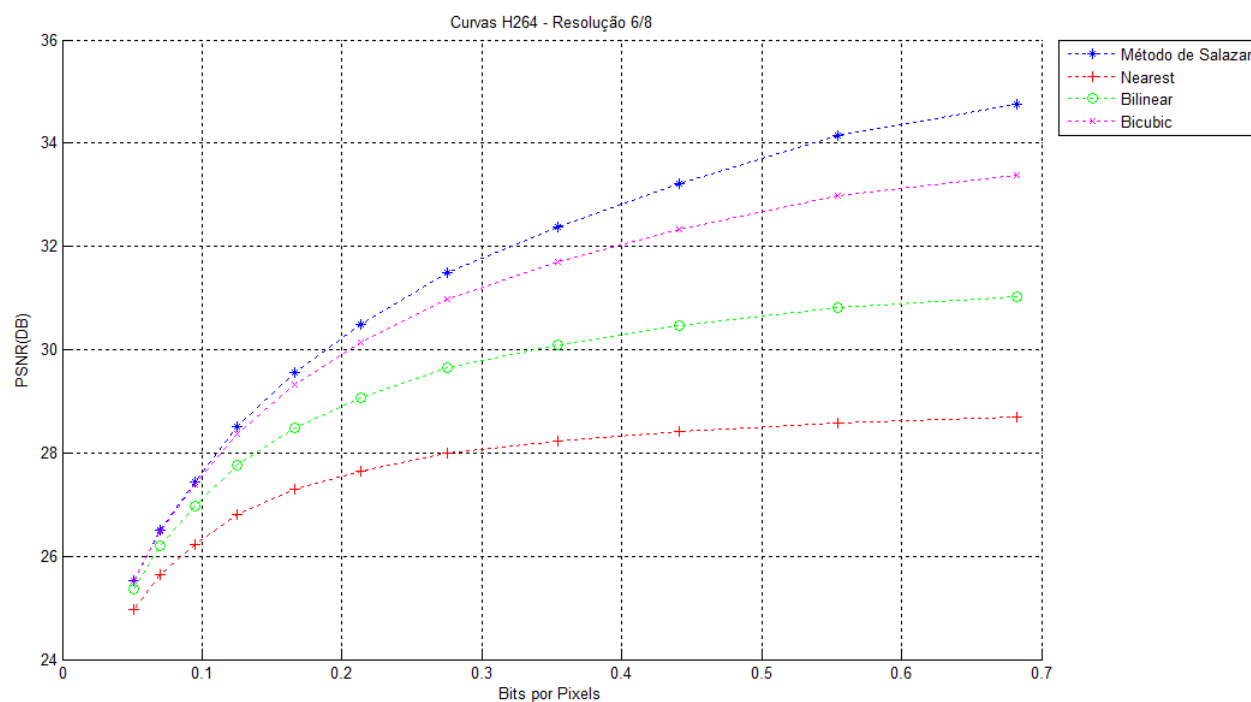


Figura 34 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 6/8

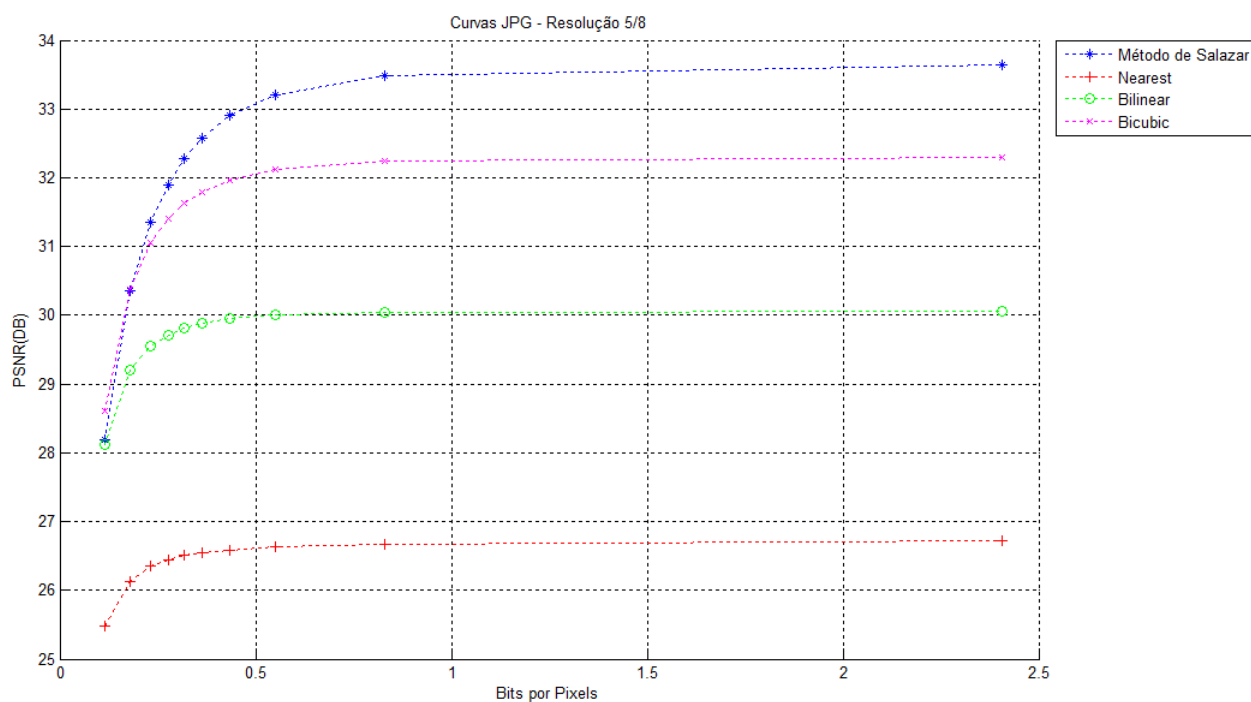


Figura 35 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 5/8

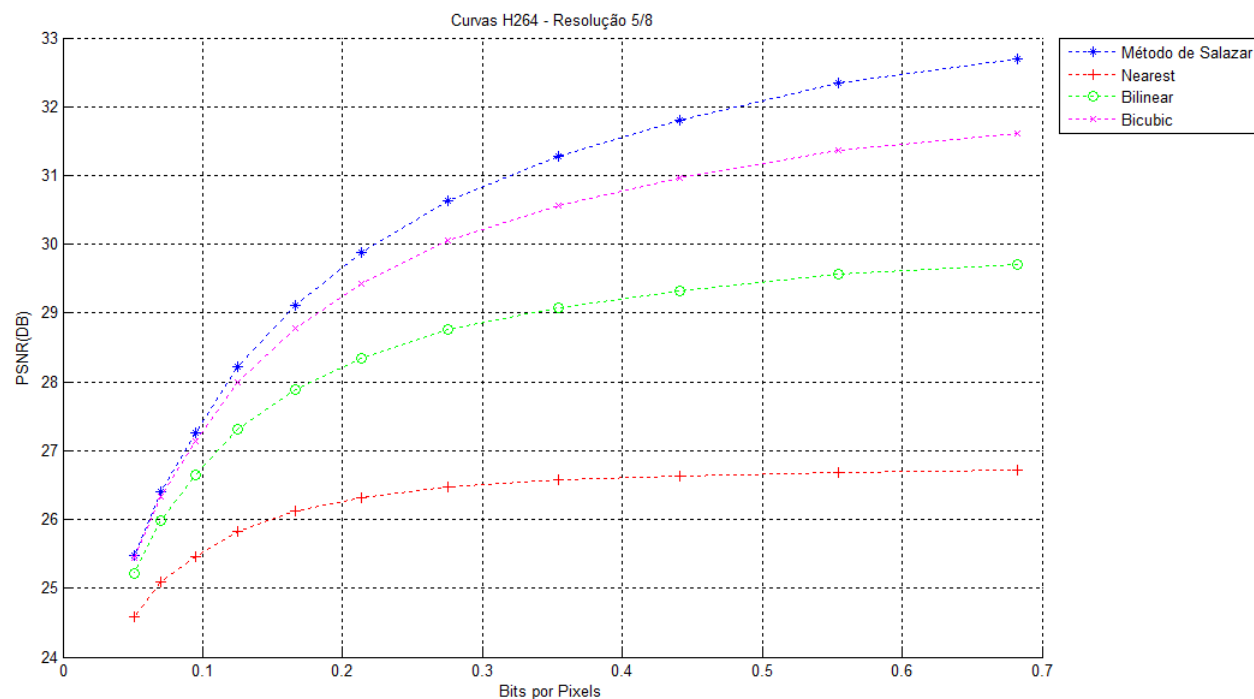


Figura 36 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 5/8

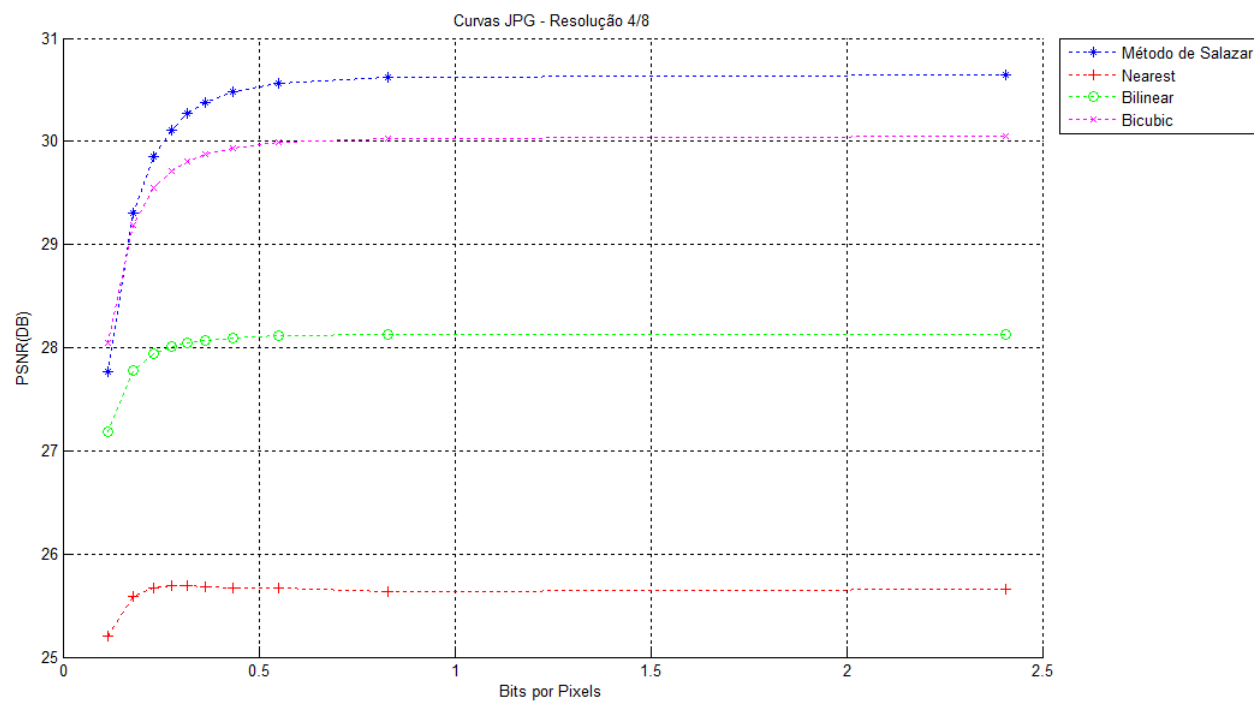


Figura 37 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 4/8

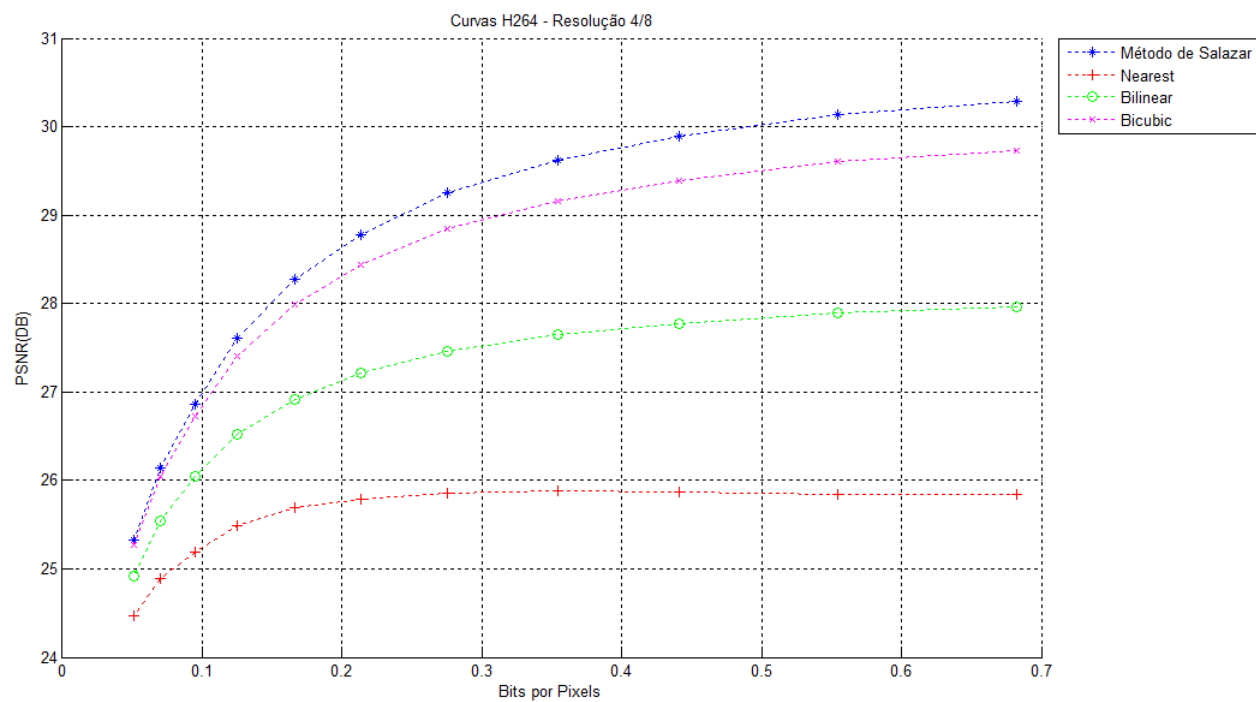


Figura 38 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 4/8

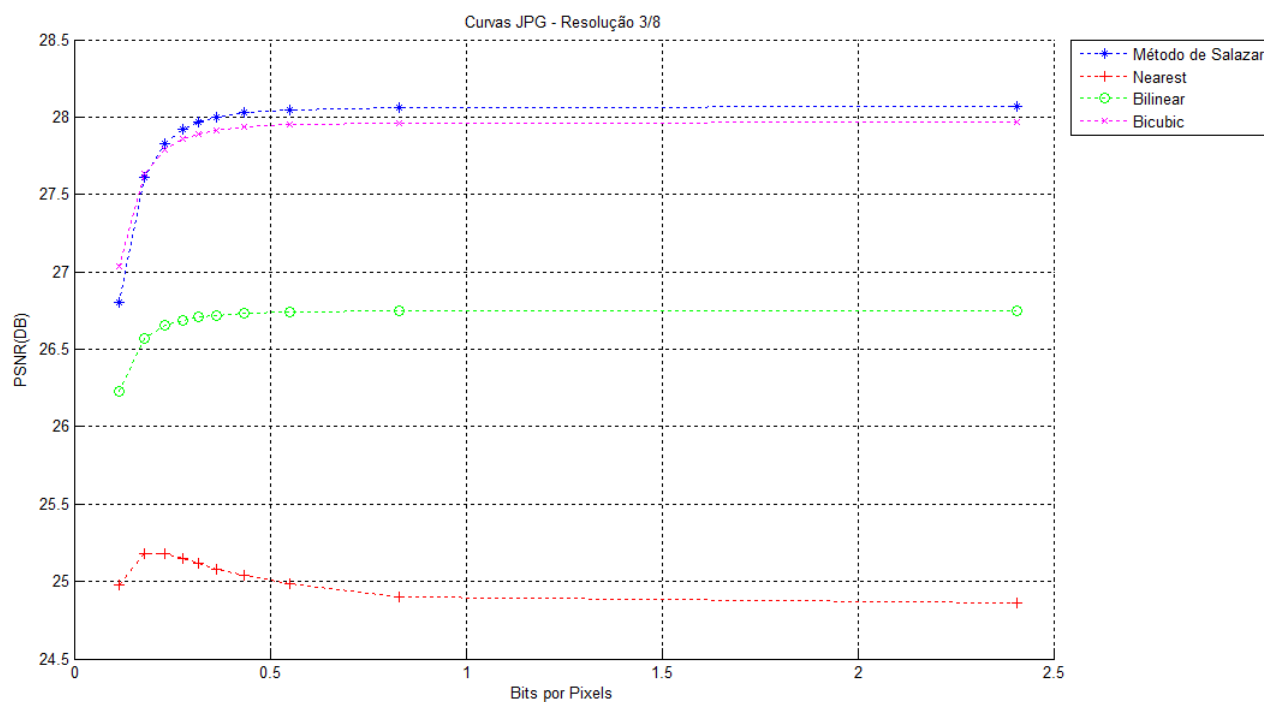


Figura 39 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 3/8

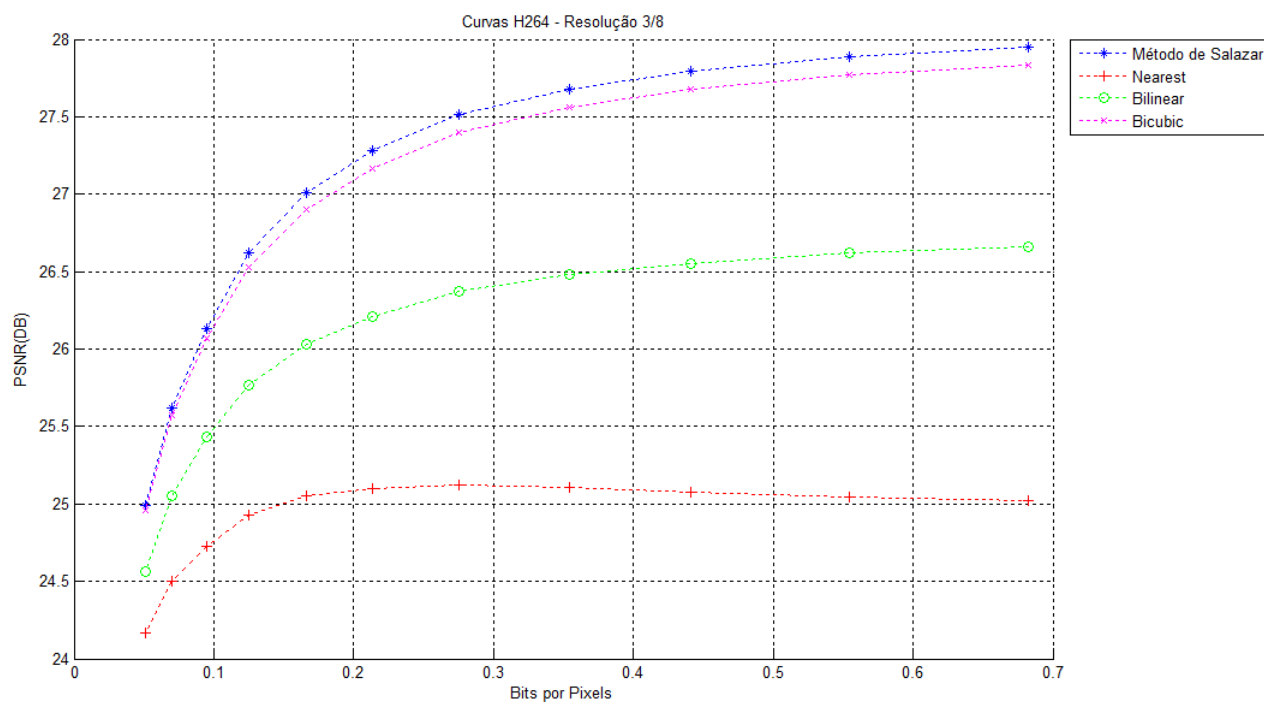


Figura 40 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 3/8

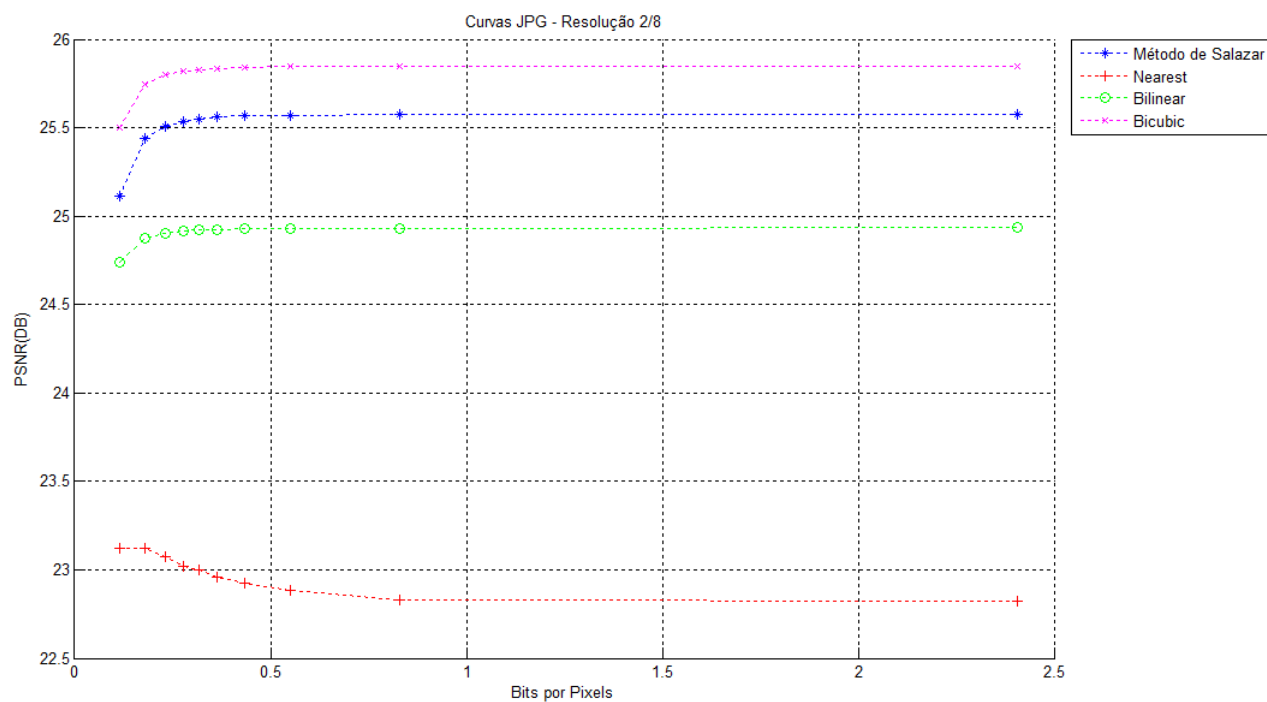


Figura 41 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 2/8

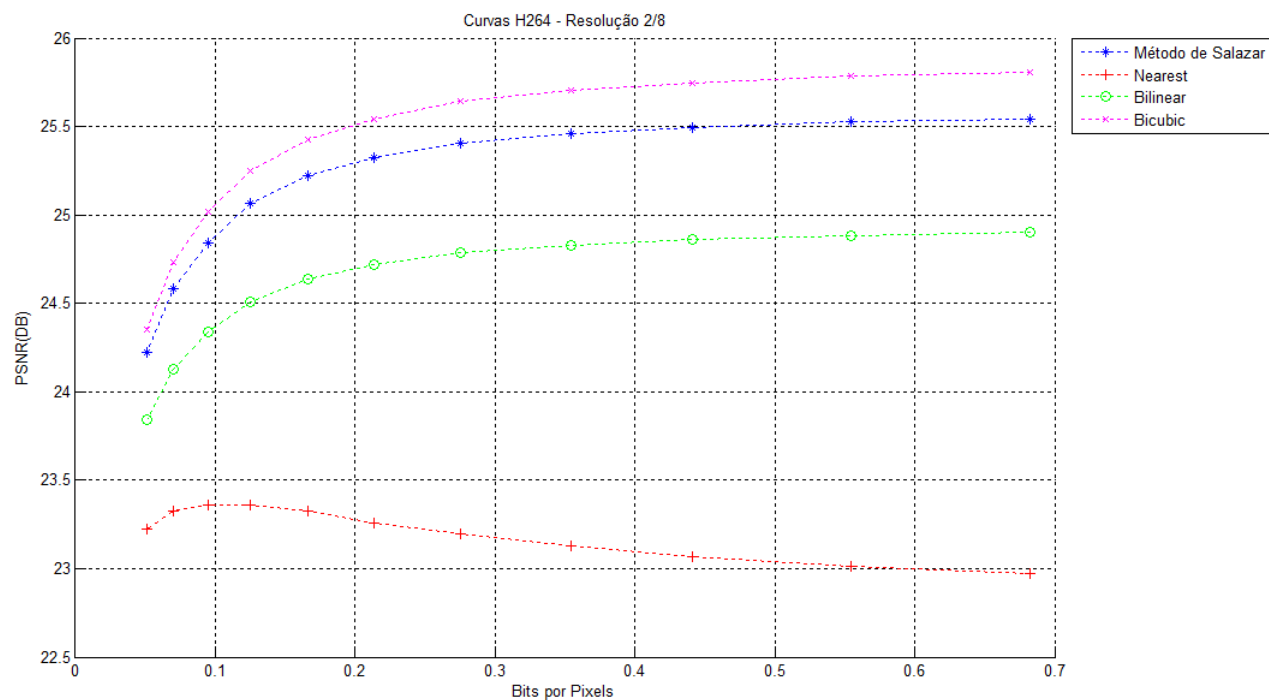


Figura 42 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 2/8

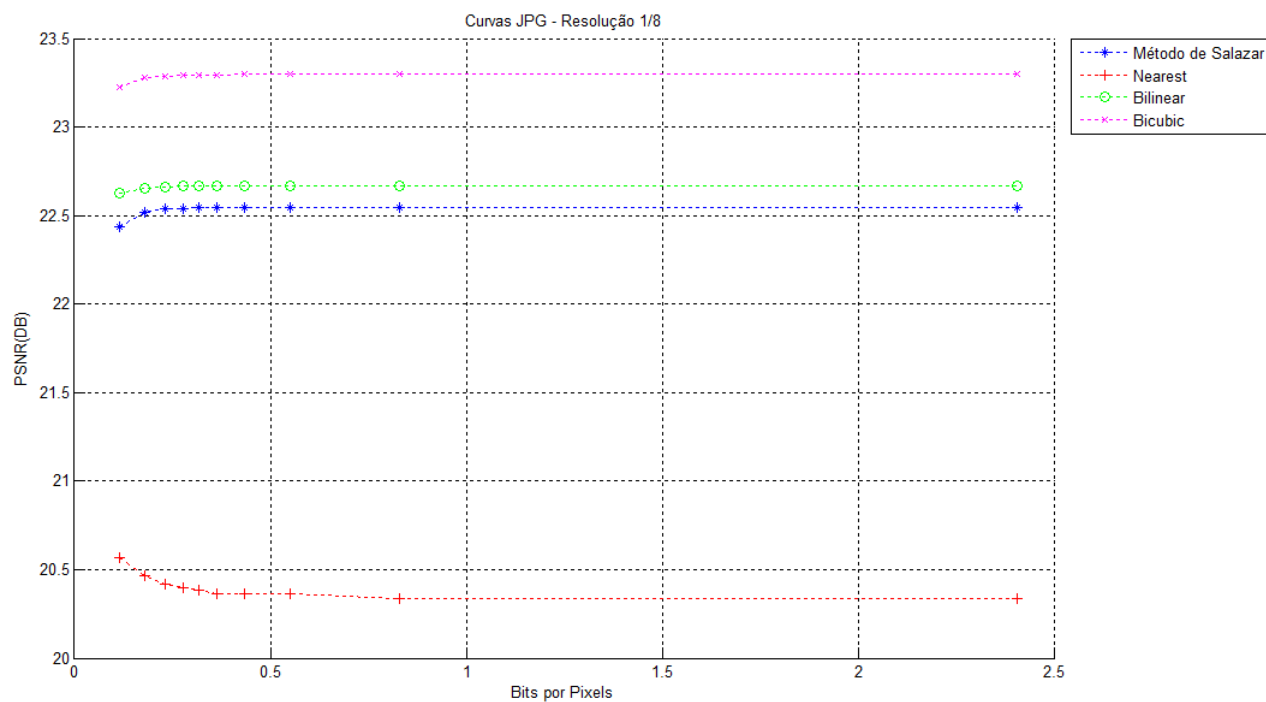


Figura 43 – Resposta das curvas de interpolações com o JPEG resolução 1/8

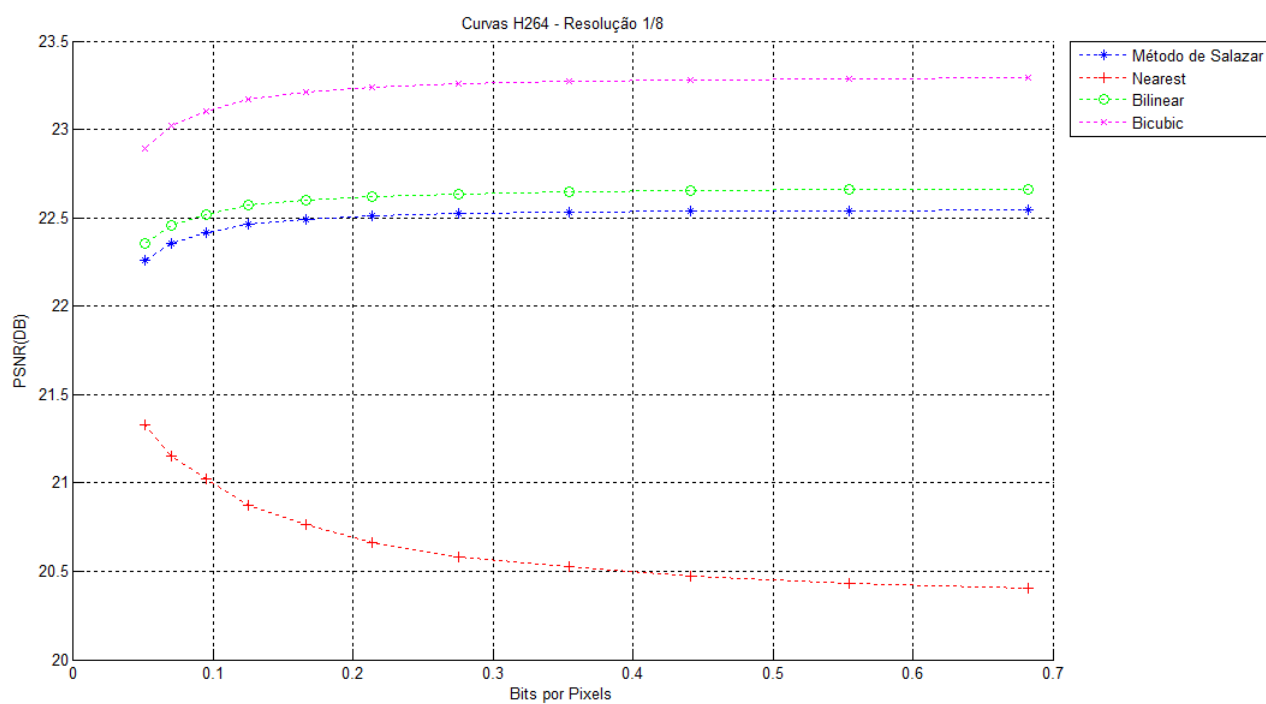


Figura 44 – Resposta das curvas de interpolações com o H.264/AVC resolução 1/8

APÊNDICE B – Resultados

Os resultados foram obtidos com base no algoritmo da seção 3.4 que de acordo com os gráficos neste apêndice é notável o ganho real extraído da técnica desenvolvida neste trabalho. Cada imagem resultou em 4 gráficos para análise onde dois dos gráficos foram resultados de imagens processada usando a compressão JPEG e os outros dois gráficos resultantes de imagens codificadas em H.264/AVC. Dentre o par de gráficos, um gráfico refere-se à taxa de distorção e o outro ao tempo gasto pela decodificação da imagem de referência comparado com a imagem reduzida para ambas às compressões.

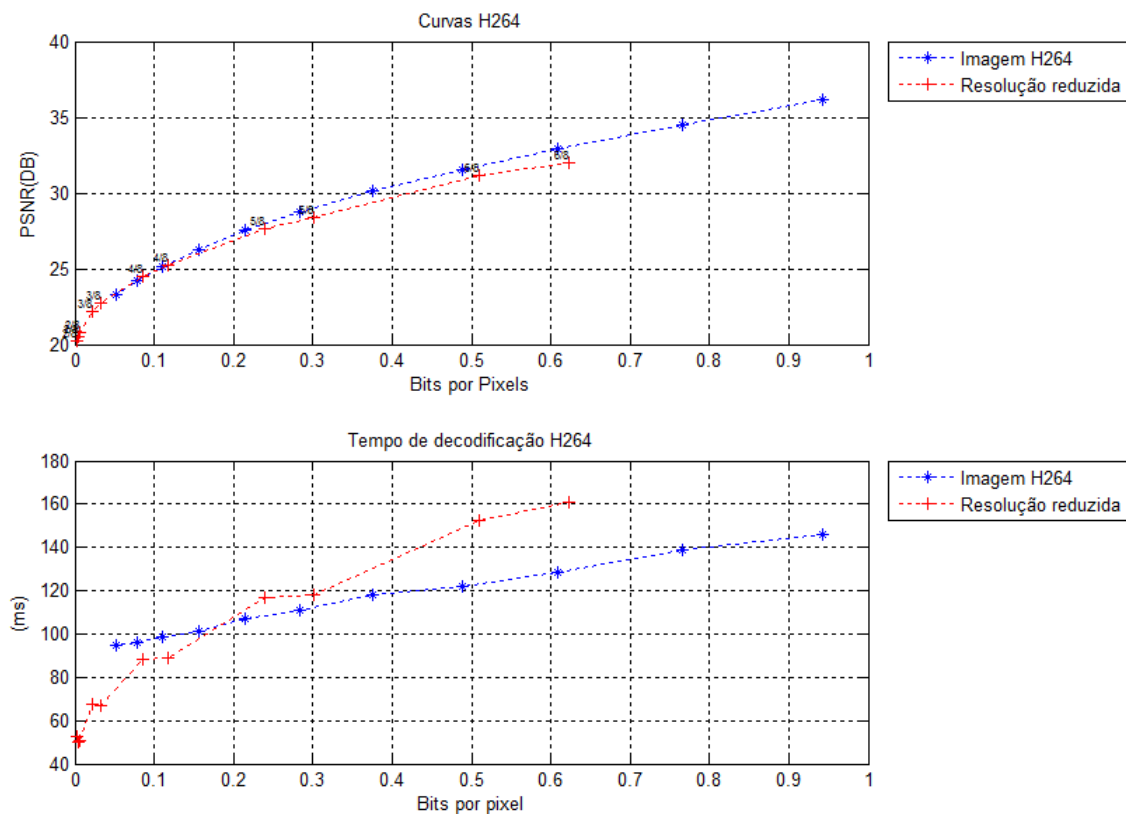


Figura 45 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Mobcal que foi codificada pelo H.264//AVC

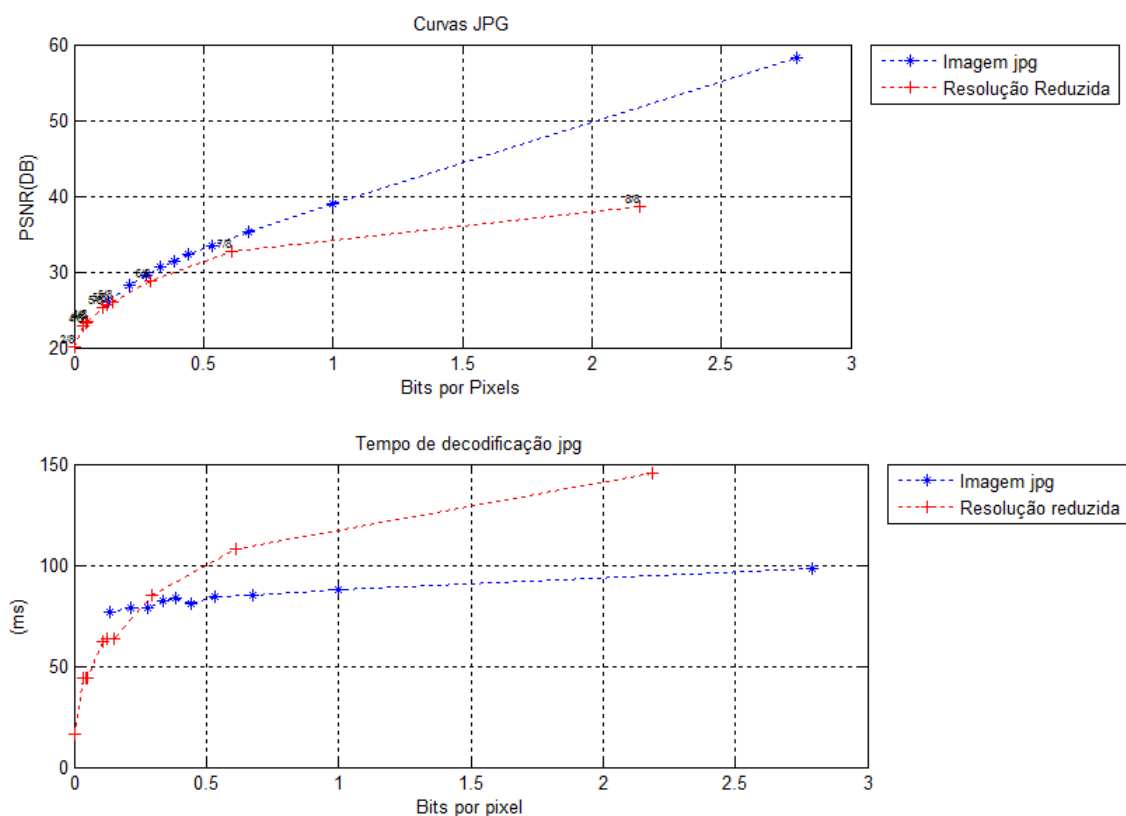


Figura 46 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Mobcal que foi codificada pelo JPEG

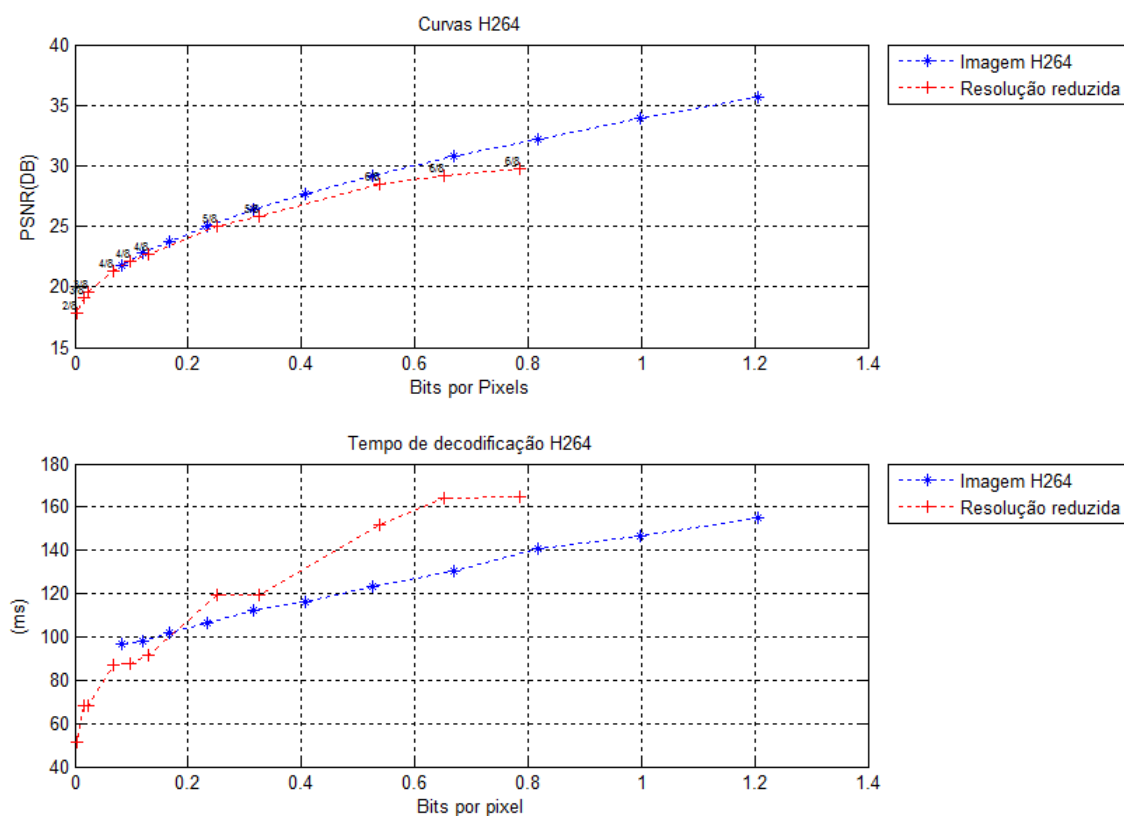


Figura 47 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Parkrun que foi codificada pelo H 264 // AVC

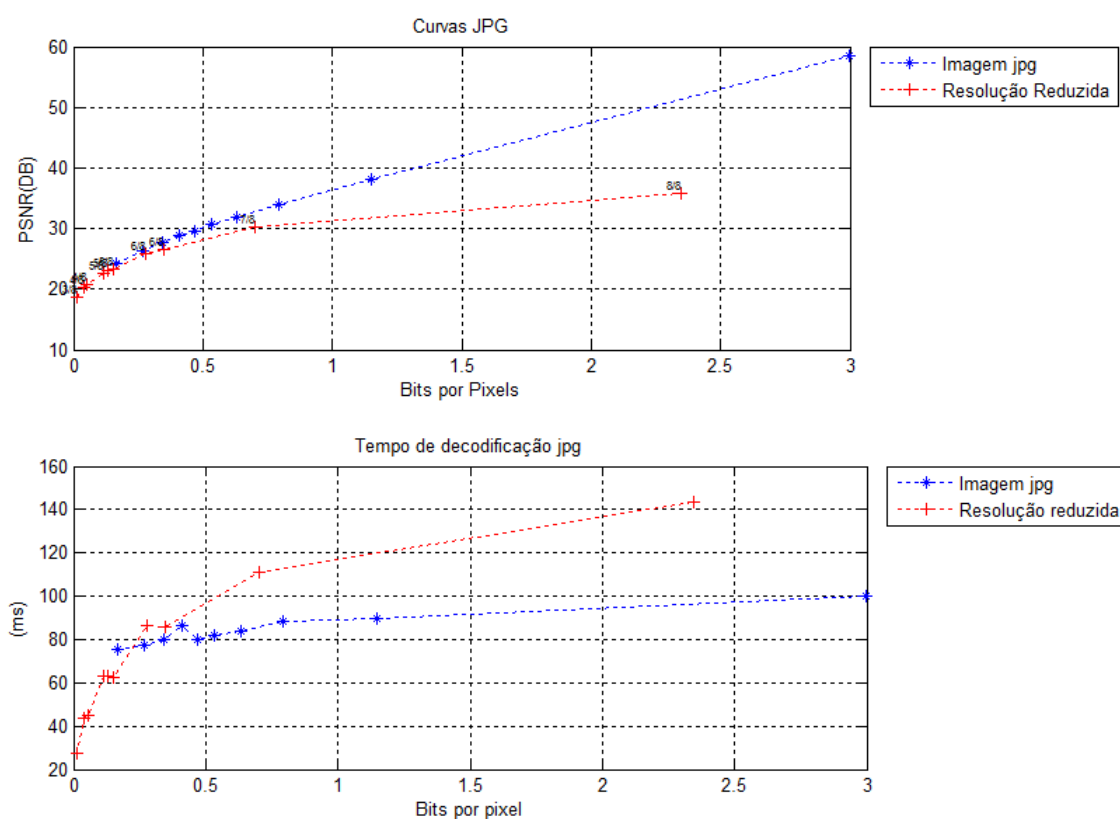


Figura 48 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Parkrun que foi codificada pelo JPEG

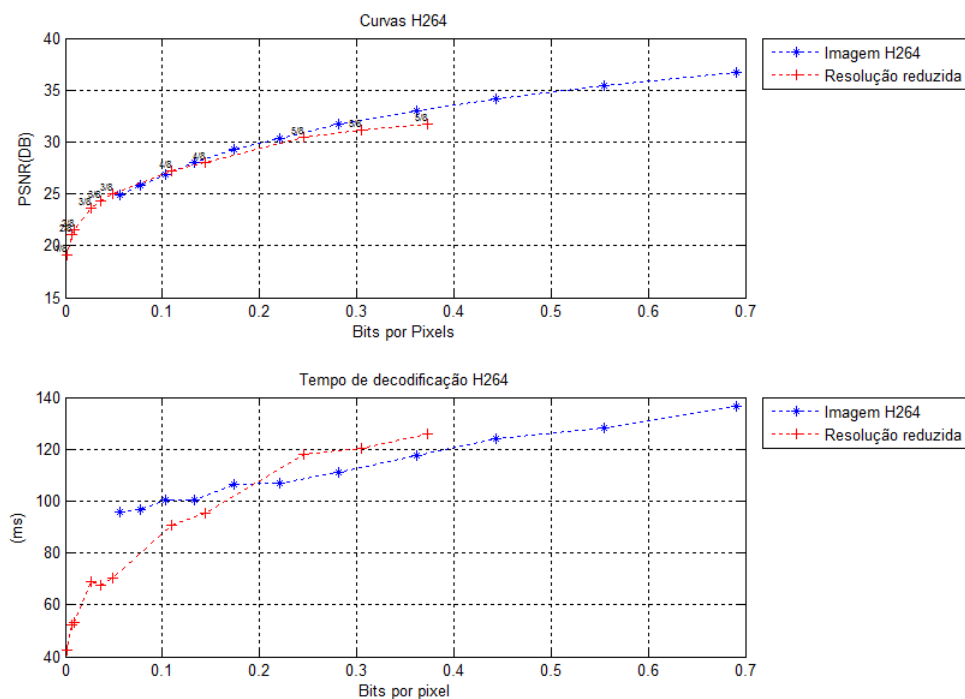


Figura 49 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Shield que foi codificada pelo H.264//AVC

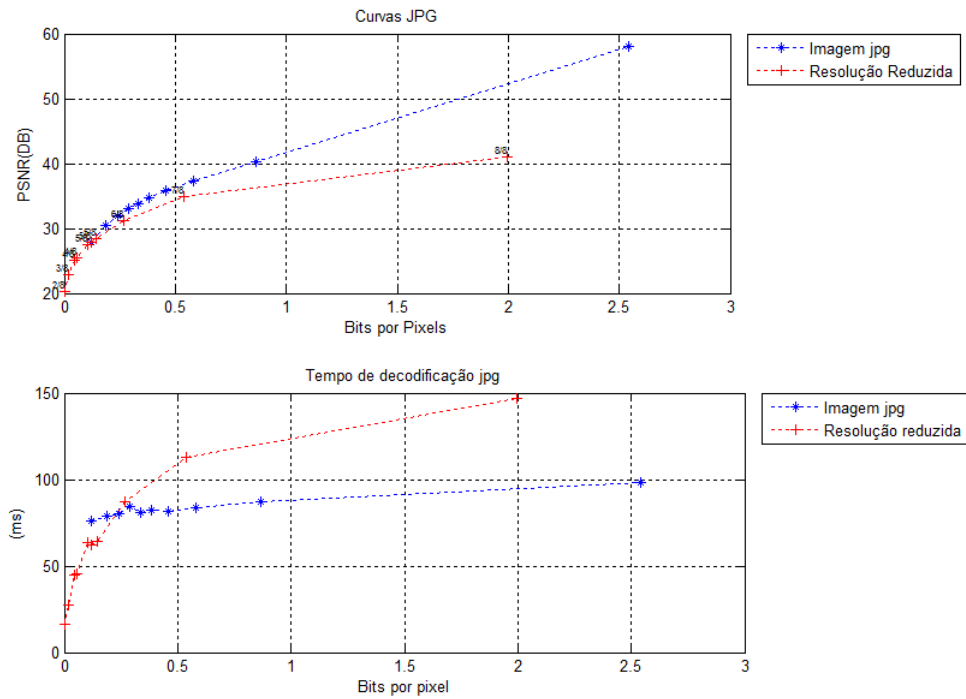


Figura 50 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Shield que foi codificada pelo JPEG

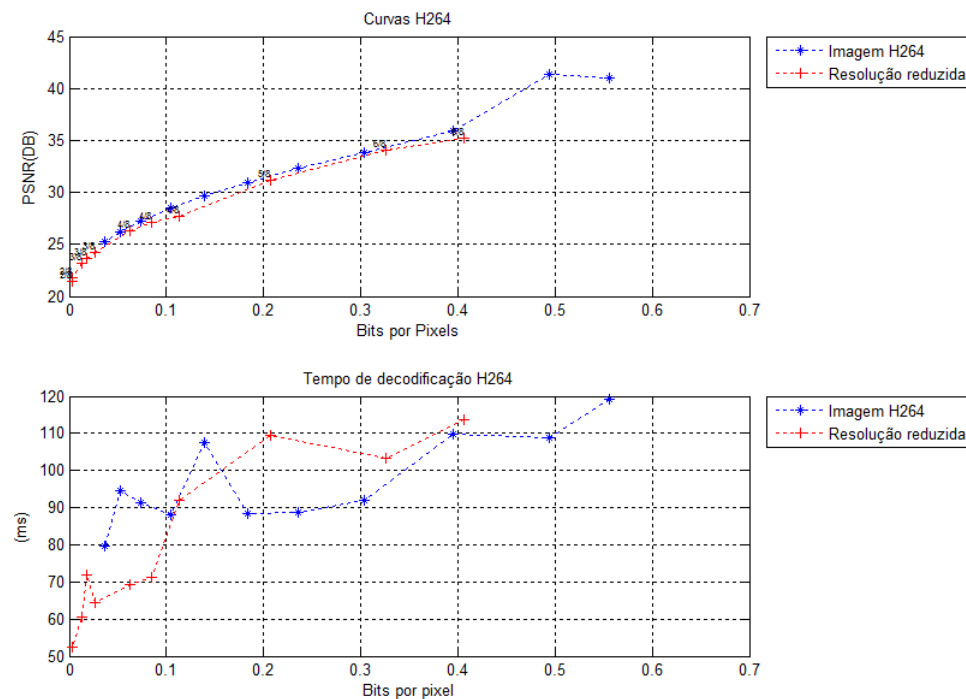


Figura 51 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem City que foi codificada pelo H.264//AVC

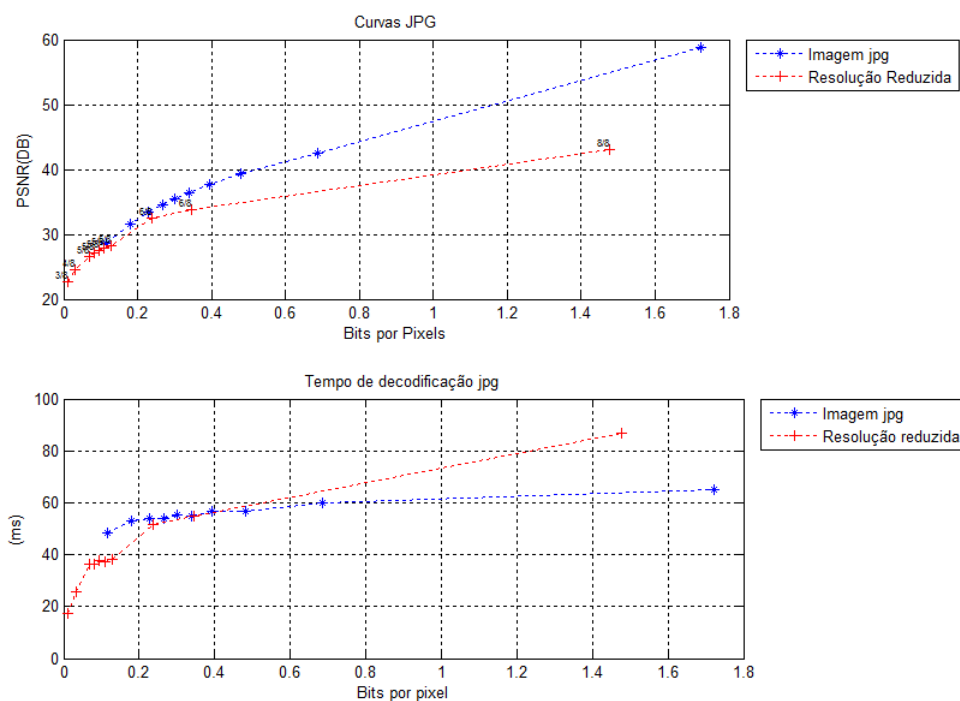


Figura 52 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem City que foi codificada pelo JPEG

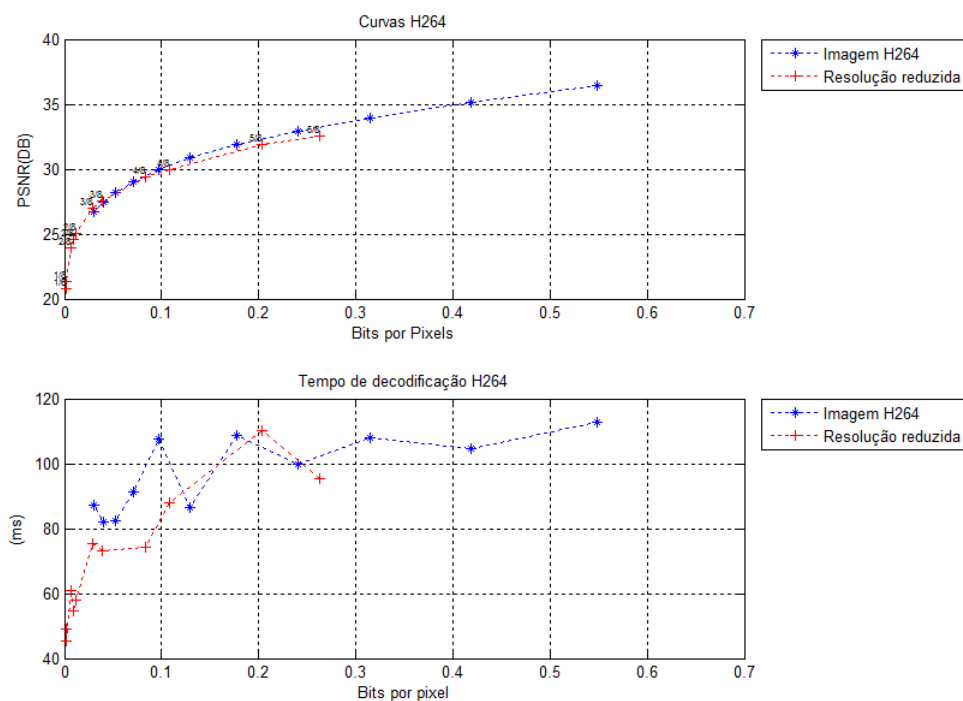


Figura 53 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Goldhill que foi codificada pelo H.264//AVC

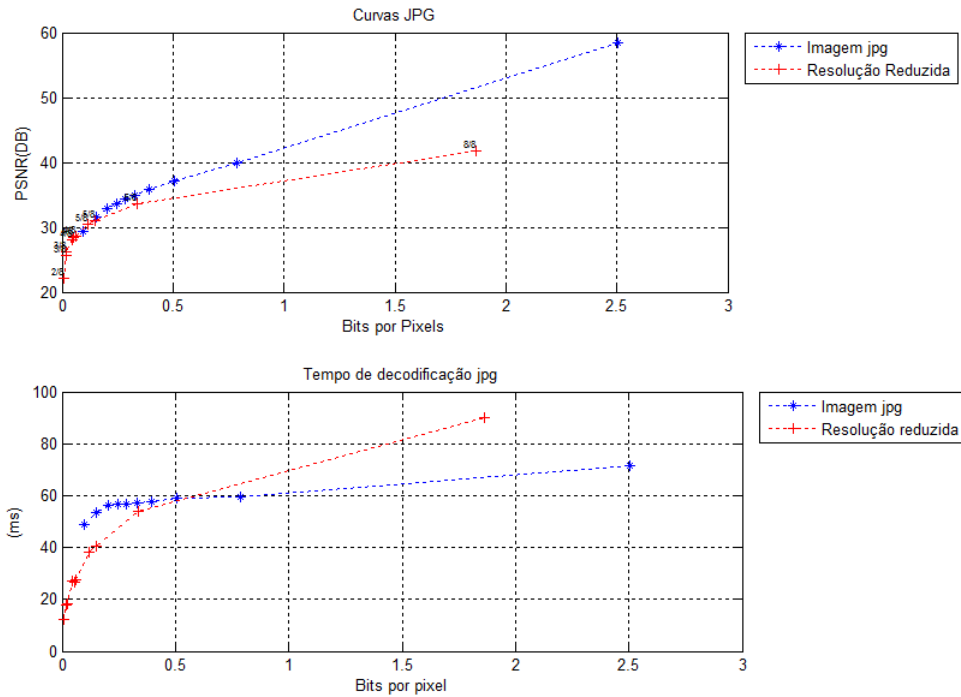


Figura 54 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Goldhill que foi codificada pelo JPEG

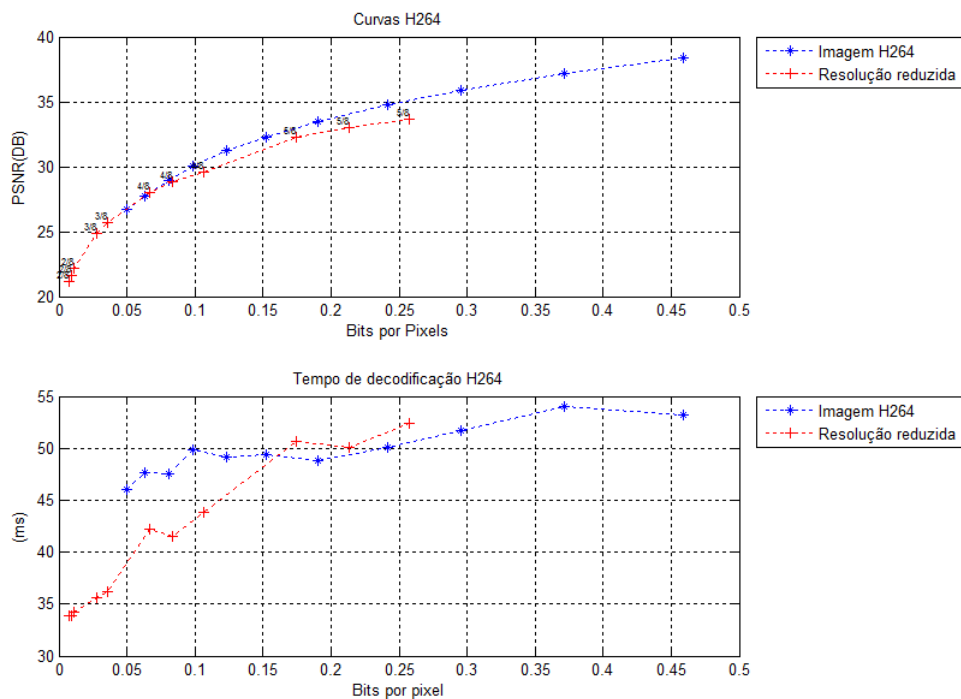


Figura 55 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Airplane que foi codificada pelo H.264//AVC

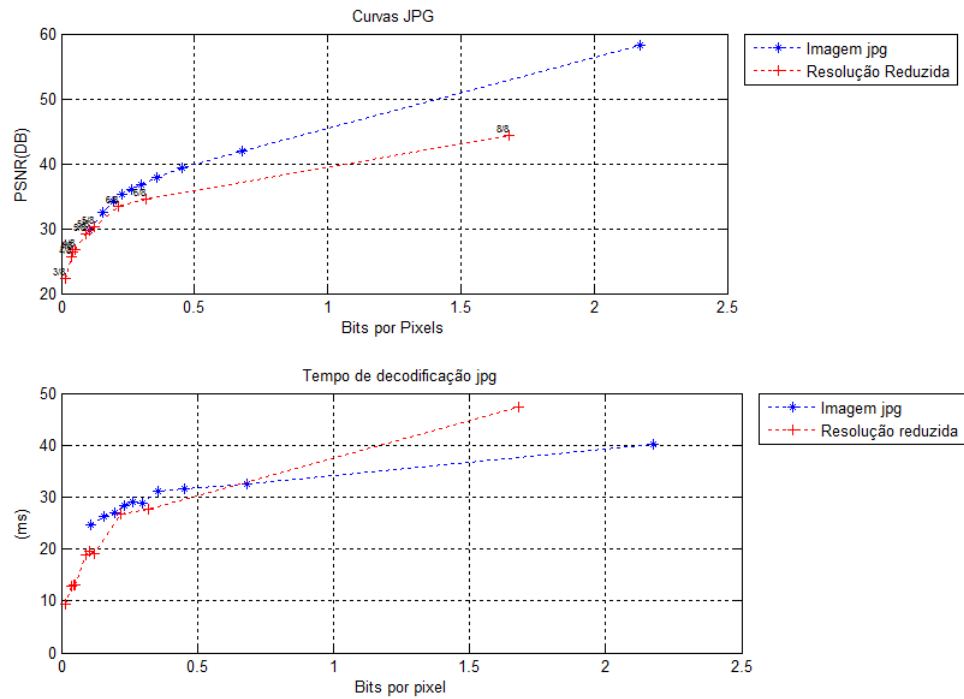


Figura 56 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Airplane que foi codificada pelo JPEG

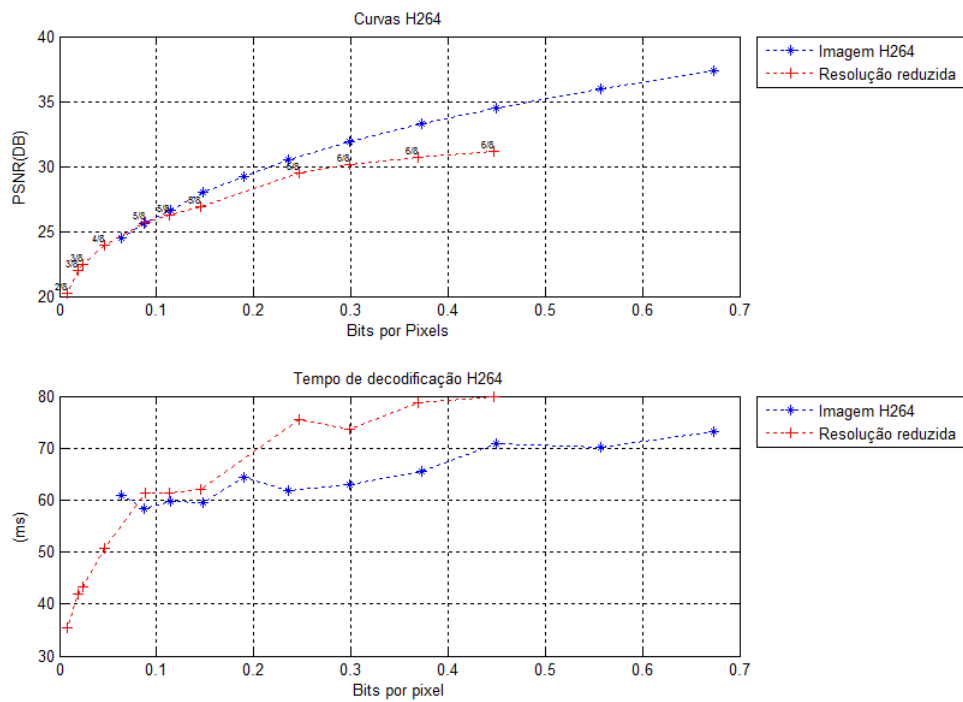


Figura 57 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Barbara que foi codificada pelo H.264//AVC

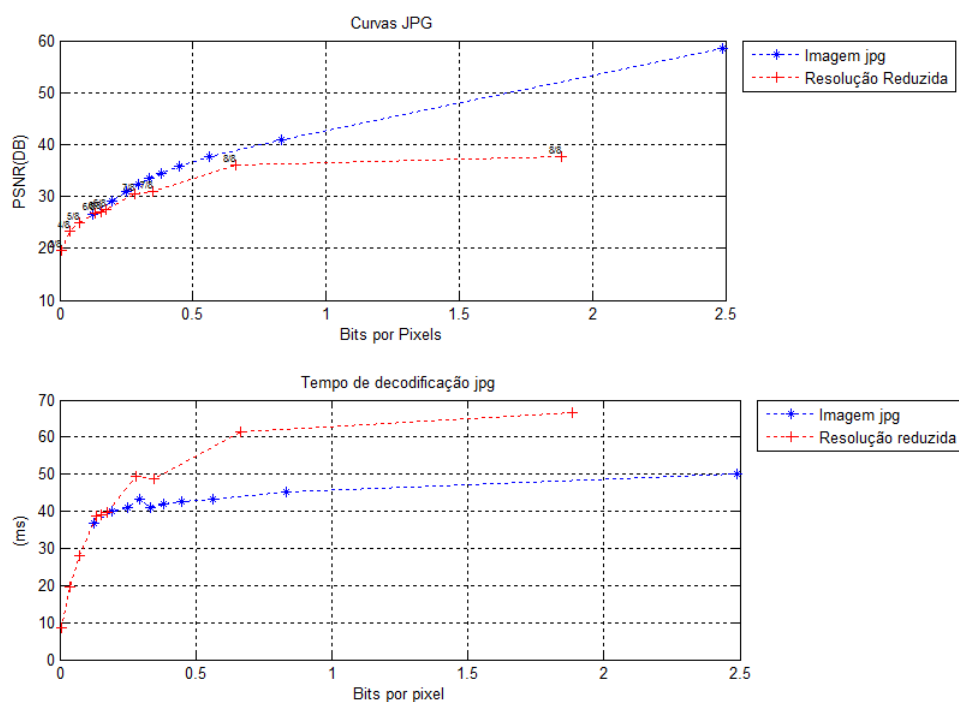


Figura 58 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Barbara que foi codificada pelo JPEG

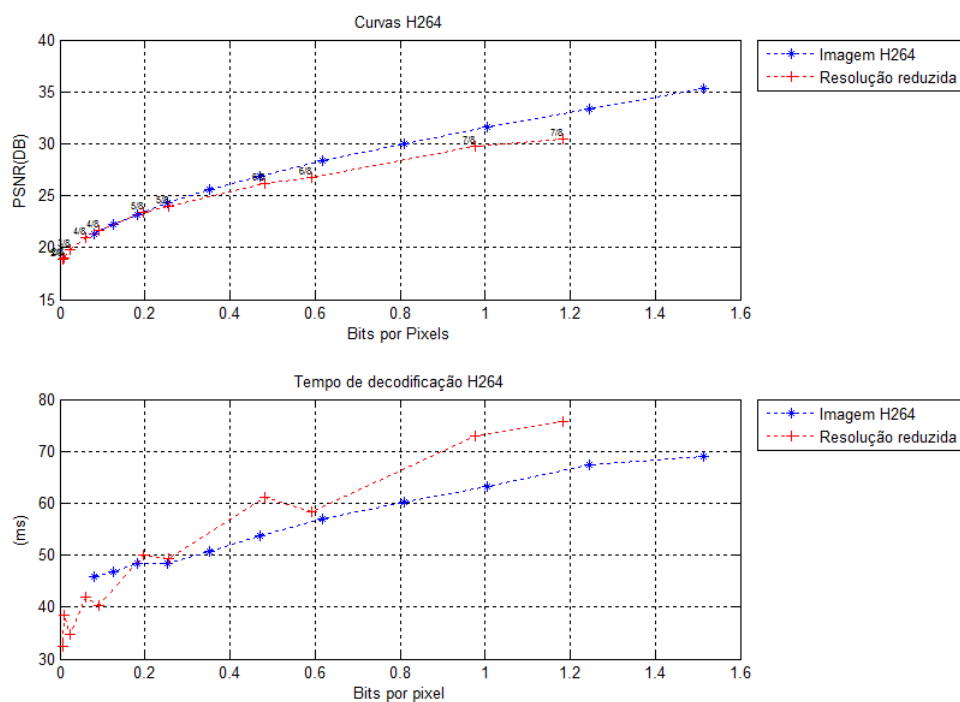


Figura 59 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Mandrill que foi codificada pelo H.264//AVC

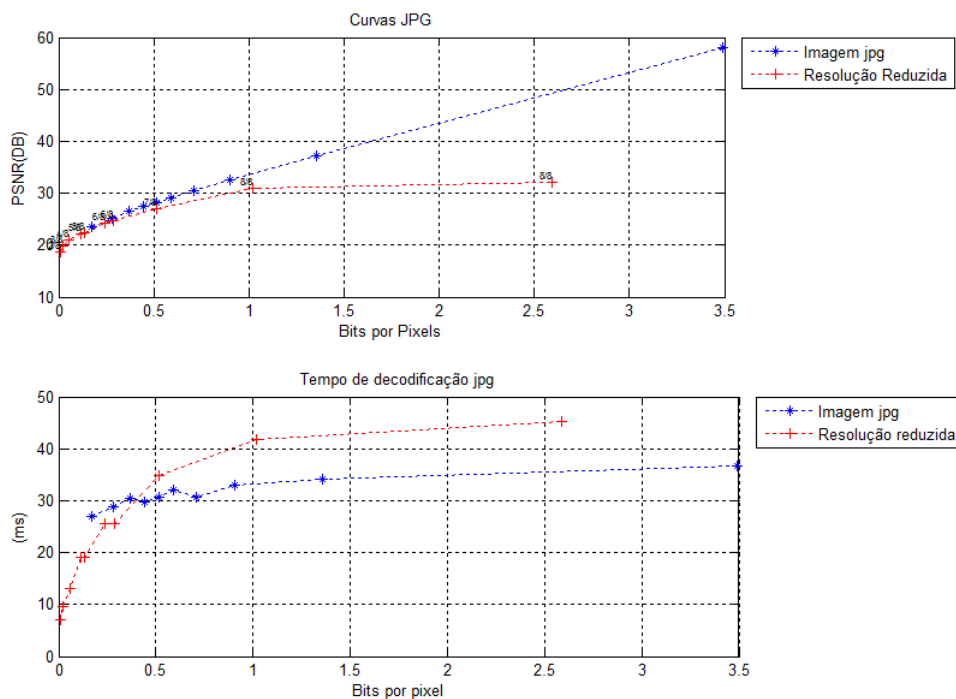


Figura 60 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Mandrill que foi codificada pelo JPEG

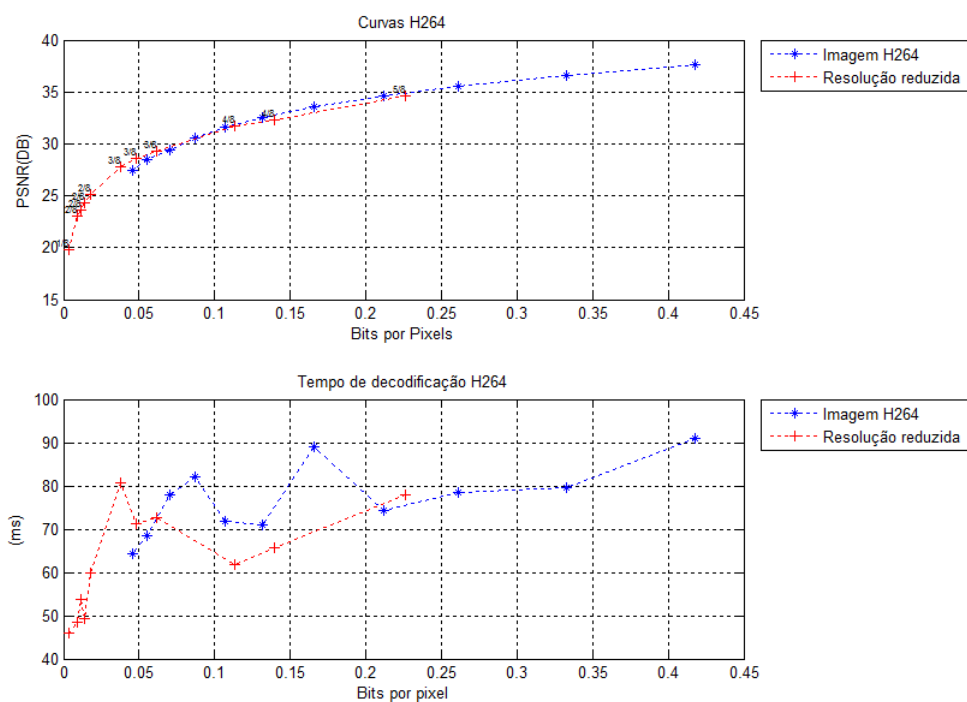


Figura 61 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Lena que foi codificada pelo H.264//AVC

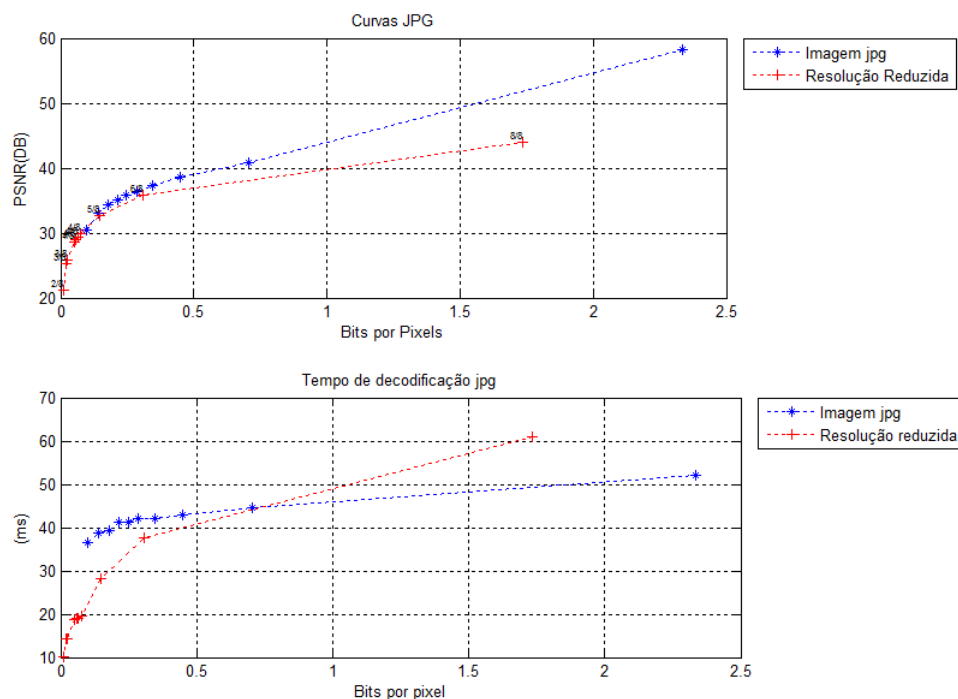


Figura 62 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Lena que foi codificada pelo JPEG

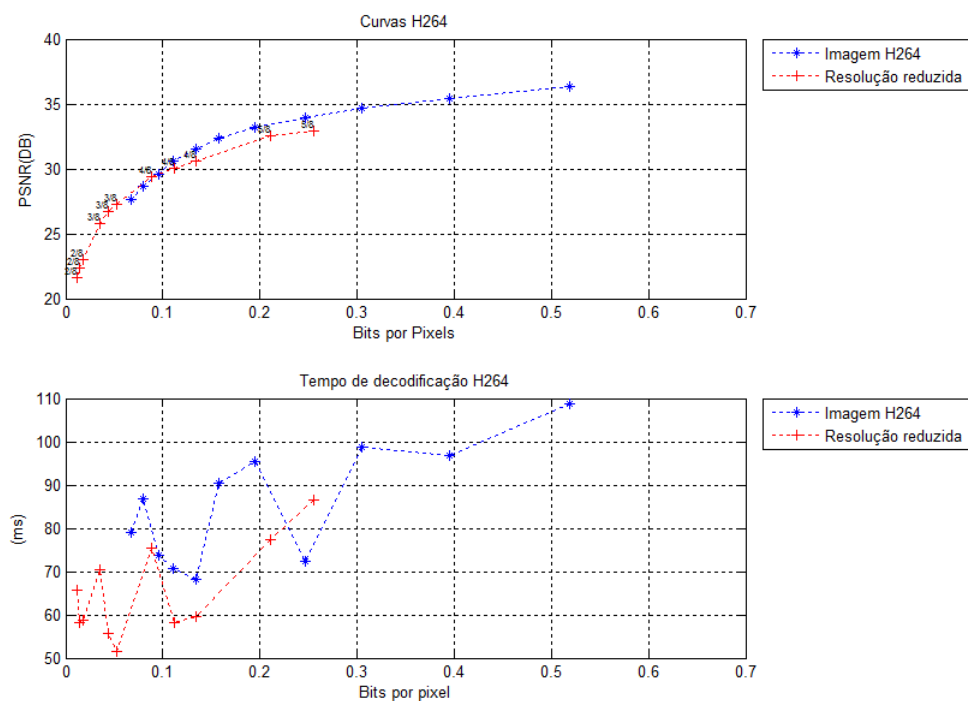


Figura 63 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Peppers que foi codificada pelo H.264//AVC

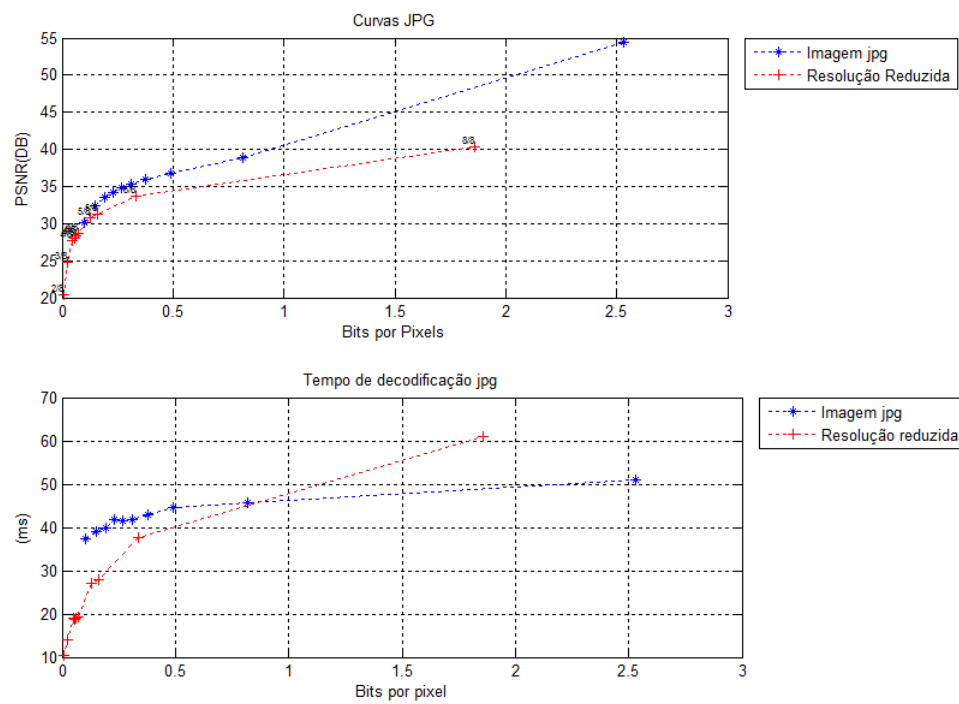


Figura 64 – Estas são as curvas de distorção e de tempo gasto em consequência do aumento da resolução resultantes das análises na imagem Peppers que foi codificada pelo JPEG

APÊNDICE C – Imagens vistas no Receptor

Após a recepção, serão aplicadas nas imagens a técnica de aumento de resolução onde os resultados subjetivos estão presentes neste apêndice. O processo foi realizado com base nos parâmetros da tabela 1. Tendo como benefício o custo de energia reduzido e a redução no tempo de transmissão das imagens JPEG.

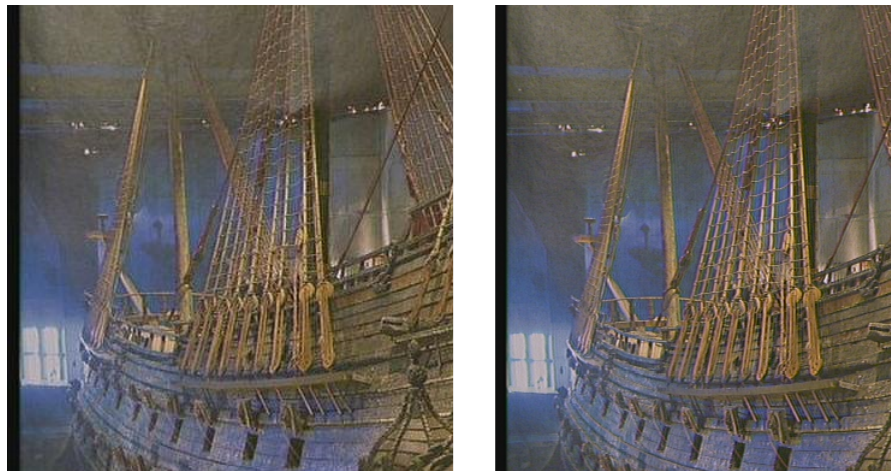


Figura 65 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada.(Mobcal)



Figura 66 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada.(Parkrun)



Figura 67 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada.(Shields)



Figura 68 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Stockholm)



Figura 69 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Airplane)



Figura 70 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Barbara)



Figura 71 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (City)



Figura 72 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Crew)



Figura 73 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (GoldHill)



Figura 74 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Lena)

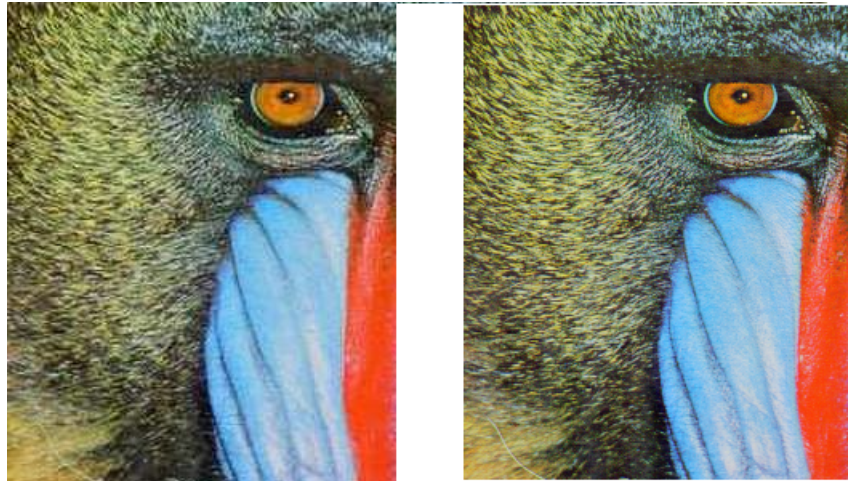


Figura 75 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Mandrill)



Figura 76 – Nesta figura estão dispostas lado a lado a imagem que passou pelo algoritmo que escolhe a melhor resolução para cumprir os objetivos propostos neste trabalho que é a economia de energia, e a imagem original que foi apenas codificada. (Peppers)

Anexos

ANEXO A – Imagens utilizada pela comunicade científica

As imagens abaixo foram utilizadas nos testes para validar os resultados do método proposto. São imagens que grupos de pesquisa em processamento de imagem utilizam para desenvolver seus trabalhos. Ao todo são 12 imagens com resoluções diferentes, adequadas ao processamento que foi efetuado no trabalho.

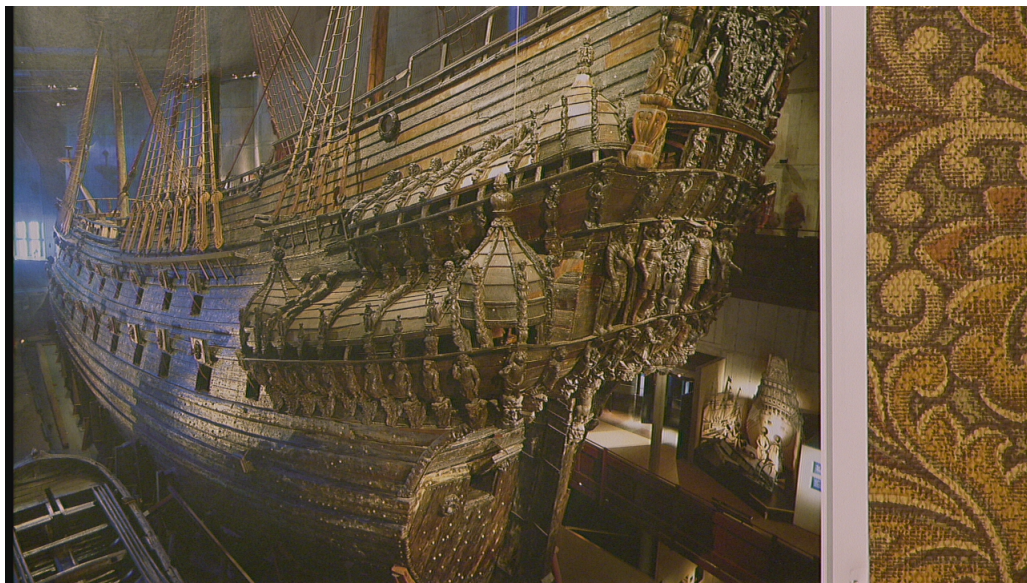


Figura 77 – Mobcal Resolução de 1280 x 720



Figura 78 – Parkrun Resolução de 1280 x 720



Figura 79 – Shields Resolução de 1280 x 720



Figura 80 – SockHolm Resolução de 1280 x 720



Figura 81 – City Resolução de 704 x 576



Figura 82 – Crew Resolução de 704 x 576



Figura 83 – GoldHill Resolução de 720 x 576



Figura 84 – Airplane Resolução de 512 x 512



Figura 85 – Barbara Resolução de 512 x 512



Figura 86 – Lena Resolução de 512 x 512



Figura 87 – Mandril Resolução de 512 x 512



Figura 88 – Peppers Resolução de 512 x 512